

JAERI-M

88-140

簡易入力核断面積計算システム

第 I 版

(SINCROS-I)

1988年7月

山室信弘*

日本原子力研究所
Japan Atomic Energy Research Institute

JAERI-M レポートは、日本原子力研究所が不定期に公刊している研究報告書です。
入手の問合せは、日本原子力研究所技術情報部情報資料課（〒319-11 茨城県那珂郡東海村）あて、お申しこしください。なお、このほかに財団法人原子力弘済会資料センター（〒319-11 茨城県那珂郡東海村日本原子力研究所内）で複写による実費頒布をおこなっております。

JAERI-M reports are issued irregularly.

Inquiries about availability of the reports should be addressed to Information Division Department of Technical Information, Japan Atomic Energy Research Institute, Tokaimura, Naka-gun, Ibaraki-ken 319-11, Japan.

©Japan Atomic Energy Research Institute, 1988
編集兼発行 日本原子力研究所
印 刷 いばらき印刷株

簡易入力核断面積計算システム
第 I 版
(SINCROS-I)

日本原子力研究所東海研究所
シグマ研究委員会核データ専門部会
山室信弘 *

(1988年6月27日受理)

統計モデル及び前平衡モデルを用いて、原子核断面積をできるだけ効率的かつ容易に計算するため、簡易入力形式を持つ計算システムを開発した。システムは ELIESE-GNASH 接続プログラムと DWUCK プログラムから構成されており、グローバル光学モデルポテンシャルの一組が組み込まれている。離散準位データは ENSDF ファイルから作られたデータを補正し、かつ入力形式を変換して用意される。今度完成された第 I 版によって ^{27}Al から ^{109}Ag に至る 25 核種の 20 MeV までの中性子断面積が計算された。その結果この質量数領域での計算と実験データとの一致は良好であった。簡易入力核断面積計算システム第 1 版の有用性が示されたものと考えられる。

A Nuclear Cross Section Calculation System
with Simplified Input-Format

Version I
(SINCROS-I)

Nobuhiro YAMAMURO*

Japanese Nuclear Data Committee
Subcommittee on Nuclear Data
Tokai Research Establishment
Japan Atomic Energy Research Institute
Tokai-mura, Naka-gun, Ibaraki-ken

(Received June 27, 1988)

To calculate the nuclear cross sections with a statistical and preequilibrium model as efficiently and easily as possible, a calculation system with simplified input-format has been developed. The system is composed of the ELIESE-GNASH joint program and the DWUCK program. A set of global optical model potential parameters is programmed in the codes. The discrete level data are prepared from ENSDF file after correction and input-format conversion. Using the present version, neutron cross sections for 25 nuclides covering the range from ^{27}Al to ^{109}Ag were calculated up to 20 MeV. As the result of general agreements with experimental data for wide mass range, the availability of the present version is proved.

Keywords: Computer Program, Nuclear Cross Section, ELIESE, GNASH,
DWUCK, SINCROS

* NAIG Nuclear Research Laboratory, Nippon Atomic Industry Group Co.,
Ltd.

目 次

1.はじめに	1
2.ELIESE-GNASH接続プログラム(EGNASH)	3
3.ELIESE簡易版(ELIESES)	10
4.離散準位データの作成	13
5.DWUCK 改良版(DWUCKY)	15
6.核断面積計算の標準的手順と計算結果	18
7.あとがき	23
参考文献	25
付録 核断面積計算図表	45

Contents

1. Introduction	1
2. ELIESE-GNASH Joint Program (EGNASH)	3
3. ELIESE Simplified-Input Version (ELIESES)	10
4. Preparation of Discrete Level Data	13
5. DWUCK Simplified-Input Version (DWUCKY)	15
6. Standardization for Nuclear Cross Section Calculation and Results of Calculations	18
7. Summary	23
References	25
Appendix Figures for Nuclear Cross Section Calculations	45

1. はじめに

入力形式を簡易にし、比較的容易に核断面積の詳細計算を試みることのできる計算システムがほぼ完成した。そこで入力形式を中心として、同システムの解説を行なうことで利用者の便に供することにした。

本システムの適用範囲は質量数20以上、ただし変形の大きい核や核分裂性のものには差し当り用いられない。又 width fluctuation の補正が入っていないから低エネルギーでの非弾性散乱、ならびに放射捕獲断面積は正しく与えられない。しかししきい反応、核異性体生成、ガンマ線生成断面積などが得られる。本システムの構成を第1図に与える。中心になっているのはELIESE¹⁾ - GNASH²⁾ joint プログラム（略称EGNASH）である。離散準位データならびに直接過程断面積の計算を予め実行しておけば、後述する簡易化されたEGNASHの入力を行なうだけで、しきい断面積などの計算結果をえられる。つまり EGNASHの中には ELIESEの一部が組み込まれており、粒子透過係数が計算され、それが直ちに断面積の計算に利用される。計算結果を file44 に保存しておけば、GAMFIL コード²⁰⁾によって B-FORMATを作ることができるのは従来通りである。（現在核異性体生成断面積及び DDX は file44 に入力されるようになっていない）

透過係数を計算するための光学ポテンシャルとしては次のものが内蔵されている。

(1) 中性子 Walter-Guss ポテンシャル³⁾

このポテンシャルは $A > 53$, $E_n = 10 - 80 \text{ MeV}$ について与えられたものである。そこで筆者により $0 \sim 20 \text{ MeV}$ で表面型吸収項が次のように与えられている。

$$0 - 10 \text{ MeV} \quad W_s = 5.0 - 14.94 \left(\frac{N-Z}{A} \right) + 0.271 \times E_{\text{Lab}}$$

$$10 - 20 \text{ MeV} \quad W_s = 7.71 - 14.94 \left(\frac{N-Z}{A} \right)$$

$$20 \text{ MeV 以上} \quad W_s = 10.85 - 14.94 \left(\frac{N-Z}{A} \right) - 0.157 \times E_{\text{Lab}}$$

20 MeV 以上は原典通りのものである。この結果低エネルギーでの中性子反応の計算にも適用できるようになっている。

(2) 陽子 Perey ポテンシャル⁴⁾

(3) α 粒子 Lemos ポテンシャル⁵⁾

(4) 重陽子 Lohr-Haeverli ポテンシャル⁶⁾

(5) トリトン Becchetti, Jr-Greenlees ポテンシャル⁷⁾

(6) ^3He 粒子 Becchetti, Jr-Greenlees ポテンシャル⁷⁾

もし内蔵されたもの以外のポテンシャルを用いた場合は、入力の簡易化された ELIESE-3G (略称 ELIESES) を用いて従来のように file27 及び 28 を作り、これを EGNASH に読ませて計算を進めるようにすればよい。

以下 2 章に EGNASH の入力形式、3 章に ELIESES の入力形式、4 章に ENSDF から離散

準位データを作る変換コード、5章に入力形式が簡易化されたDWUCK4(略称DWUCKY)について述べる。最後に6章には本システムで核断面積を計算する場合の標準的手順と計算結果の一部を述べる。

2. ELIESE-GNASH 接続プログラム (EGNASH)

[入力形式]

本プログラムはELIESEとGNASHを接続し、かつ入力形式を簡易化したものである。内蔵された光学モデルを使う場合ELIESEの入力を要しない。以下入力カード順に説明する。

カード番号	FORMAT	変数	数
1, 2	20A 4	TITLE	
3	16 I 5	NI, IPR, IOM, ITC, IANG, KLIN, IGLCM, LPEQ, NLDIR, ICAPT, ISO, IFISIL, IDFG	
4	8E 10.3	ZAP, ZAT, DE, F 2, F 3, CSIG	
5	8E 10.3	ANG 1, ANG 2, ANG 3, EGS, SPINGS, PARGS	
6	16 I 5	NELAB	
7	8 E 10.3	(ELABS(I), I = 1, NELAB) I = 1, NI (カード8及び9の繰返し)	
8	8 E 10.3	ZACN(I), XNIP(I), GWD(I), SWS(I)	
9	8 E 10.3	XNLI(I), AI(I), PAI(I), TI(I), EMI(I), SIG2I(I), FSI(I)	
10	8 E 10.3	(RE 1(I), I = 1, 4)	
11	8 E 10.3	EG 1, GG 1, PG 1, EG 2, GG 2, PG 2, RGG	
12	8 E 10.3	EG 3, GG 3, PG 3, EGCON, EGCNM1	

カード1及び2はTITLEで80カラムをすべて用いられる。

カード3が制御のフラグをまとめたものである。

- (1) NI 多段階核反応における崩壊する原子核の数、ガンマ線のみを放出するものも含める。最大20.
- (2) I PR 出力の制御
 - 0 入力ならびに内蔵パラメタの値。粒子及びガンマ線スペクトル、準位密度パラメタ、基底状態ならびに選んだ励起状態生成断面積が出力される。
 - 1 前平衡過程断面積、崩壊ごとのスペクトルの出力が加わる。
 - 2 ガンマ線強度関数、前平衡過程スペクトル、多段階中性子放出スペクトル、離散準位データの出力
 - 3 粒子透過係数の値などすべての出力が得られる。
- (3) IOM 粒子透過係数の計算制御
 - 0 既に file 27 及び file 28 にそれぞれエネルギー点と、粒子透過係数が用意されている場合
 - 1 新たに粒子透過係数を計算する場合。この時結果を file 27 及び file 28 に作成

し保存するか、又は毎回計算を繰返すか、計算機によって選択すると良い。(原研の FACOM 780 の場合は、透過係数計算に必要な CPU は 1 秒以内であり、後者が便利である)

- 2 透過係数が計算されるとともに、反応断面積の値が出力される。

(4) ITC 粒子透過係数の交換制御

- 0 核反応におけるはじめの複合核形成に対する粒子透過係数が、プログラム内で処理されるすべての核の崩壊に際して用いられる。これは従来用いられていたものである。
- 1 入射チャンネルに対する透過係数は、はじめの複合核の崩壊のみに用いられ、つづいて生ずる多段階の核崩壊では、すべて新しい親核に対する透過係数が用意され、その核の崩壊に用いられる。 $(n, 2p)$, $(p, p\alpha)$ など荷電粒子放出の続く時に用いる必要がある。中性子放出の時、 $(n, 3n)$ 程度ではこのオプションを選ぶ必要はない。

(5) IANG 角度分布の計算制御

- 0 角度分布の計算は行なわれない。
- 1 入射粒子と同じ粒子の放出角度分布が、ANG 1, ANG 2, ANG 3 の入力に応じて計算される。出力は 10° おきに印刷される。

(6) KLIN 離散準位入力制御

- 0 予め用意されている file 8 の離散準位データが入力される。
- 5 カード入力。入力はカード番号 12 に引き続いで行なう。

(7) IGLCM 準位密度制御

- 0 部分準位密度 (partial level density)⁸⁾
 - 1 積分型準位密度 (observable level density)
- 両者は Fermi-gas 領域では全く同一であるが定温度領域でのスピン切断因子の扱い方が異なる。もし定温度領域で一定値のスピン切断因子を用いる場合には両者の区別はなくなる。筆者はすべて前者を用いている。

(8) LPEQ 前平衡過程制御

- 0 前平衡過程の計算は行なわれない。
- 1 前平衡過程の計算がマスター方程式を解く方法で行なわれる。
- 2 比較的軽い核 (例えば ^{27}Al) ではマスター方程式の解が収斂しないことがある。この時に closed form での解を採用する場合に用いる。

(9) NLDIR 非弾性散乱直接過程入力制御

- 0 直接過程断面積が入力されない。
- n 直接過程断面積が DWUCKY により予め計算され、file 33 にその断面積と角度分布が用意されている場合、直接過程断面積を計算してある準位の数 n を入力する。

(10) ICAPT 放射捕獲反応ガンマ線スペクトルの計算制御

- 0 ガンマ線スペクトルの計算は行なわれない。

1 はじめの複合核のガンマ線のカスケード崩壊の計算を実施する。従って捕獲ガンマ線スペクトル、励起準位の生成量を与える。又 ($n, \gamma n$) 反応断面積も計算される。高い入射エネルギーでは粒子放出断面積が正しく与えられない上、CPUが増すので使用を避ける。

(11) ISO 反応断面積、準位生成断面積出力制御

0 反応断面積、直接過程全断面積、CASTHYに入力する競走断面積及び基底状態生成断面積がまとめて表示される。

1 or 2 第1励起状態生成断面積の出力が加わる。

3 第2励起状態生成断面積の出力が加わる。

n 上記に加えて、($n - 1$) 励起状態生成断面積が出力。

以上は核異性体断面積の出力を利用して便利である。

(12) IFISIL 核分裂断面積計算制御

(13) IDFG 核分裂核種制御

NAIG 肥田により用意されたもので GNASH86 と同等のもの。

今後改善して本システムで核分裂断面積が扱えることが期待される。

カード4は入射粒子及び標的核の指定

(1) ZAP 入射粒子の $1000 \times Z + A$

(2) ZAT 標的核の $1000 \times Z + A$

(3) DE スペクトル計算のエネルギーBINの幅(単位 MeV)

通常0.5程度。BINの最高数は100。

(4) F2 中性子及び陽子前平衡過程断面積の調節因子。Kalbach 定数の $1/100$ に等しい。

(5) F3 α 粒子、重陽子などの pick-up 過程断面積の調節因子。0入力で内蔵値0.5が用いられる。

(6) CSIG スピン切断因子の係数。内蔵値は0.146

カード5は角度分布を計算する角度の設定、ならびに励起状態にある標的核の場合の入力用

(1) ANG1 角度分布の計算点の数。内蔵値は37、最大50。

(2) ANG2 角度の最小値。内蔵値は0。

(3) ANG3 計算する角度の間隙。内蔵値は5。

以上の値は DWUCKY で直接過程を計算するとき用いた値と同じにすること。

(4) EGS 励起エネルギー

(5) SPINGS 上記準位のスピン

(6) PARGS 同じくパリティ

カード6と7で、入射エネルギー(実験室系、単位 MeV)の点数とその値を入力する。エネルギーが増加するような順序で入力することが好ましい。

カード8は多段階反応における複合核の $1000 \times Z + A$ 、崩壊チャネル数、カード9はその核の準位密度パラメタを入力する。従って崩壊する核の数 NI 回繰返す。入力順序は親を娘より先にすればよいが、 $1000 \times Z + A$ の大きい順序に列べると良い。

- (1) ZACN(I) 崩壊する複合核の $1000 \times Z + A$
 (2) XNIP(I) 崩壊チャネルの数, 崩壊チャネルの順序はプログラムで指定されており変更できない。

XNIP	1	2	3	4	5	6	7
ガンマ線	○	○	○	○	○	○	○
中性子		○	○	○	○	○	○
陽子			○	○	○	○	○
α 粒子				○	○	○	○
重陽子					○	○	○
トリトン						○	○
^3He							○

例えば XNIP = 5. と入力すると, 上記の順序で重陽子放出まで計算される。

- (3) GWD(I) 中性子分離エネルギー E_s における放射幅 Γ_r (ev). 共鳴データを見て入力する。入力しないと熱力学的公式⁹⁾

$$\text{GWD}(I) = 7.32 \left(\frac{U}{a} \right)^{3/2} / (22 \times A)^{1/3}$$

で計算される。ここに $U = E_s - A$, a は準位密度パラメータ, A は質量数である。はじめの複合核については普通次の SWS を入力する。標的核の Γ_r は (n , $2n$) 反応断面積に影響を与える。

- (4) SWS(I) はじめの複合核の放射捕獲断面積は S 波共鳴データから与えられる Γ_{r0} を用いては普通過大な値を与える。そこで実験値に規格化して $T_r = 2\pi\Gamma_{r0}/D_0$ を定め, その値を入力する。SWS(I)を入力すると, GWD(I)の値は無視される。
 T_r の値は CASTHY コードによる計算で求められる。

カード 9 は準位密度パラメータの入力

- (1) XNLI 低エネルギー離散準位と準位密度公式で計算される連続領域の準位密度を接続する準位の番号。基底状態を 1 と数えるから, n 番目の励起準位で接ぐ場合, XNLI = $n + 1$ と入力する。入力しない場合は離散準位の最高のものが選ばれるから, 離散準位データを十分吟味して用意すれば XNLI の入力を省ける。離散準位の積み上げ図において, 指数関数的増加から外れているような場合は, その部分を除いて XNLI を小さ目に指定するとよい。プログラムでの XNLI の最高値は 35。筆者の場合 20 以下にしている例が多い。
- (2) AI 準位密度パラメータ a , 即ちフェルミガスモデルの式中に現われる定数である。本システムでは最も重要なパラメータと考えており, 注意深い選択が必要である。初期値としては, 共鳴準位間隔の平均値 $\langle D_0 \rangle$ から a を計算し, $\langle D_0 \rangle$ のない核については, ほぼ直線内挿で与えられる値をとる。その後 15 MeV 付近での計算結果を参照して調節する。 a の値の体系化は多くの計算を行なってみないと決定が困難であるが, 筆者が選んだ値は第 6 表に与えてある。もし入力しないと Gilbert-Cameron の系統式を本システムのために補正した式で計算さ

れたものが用いられるようになっている。

- (3) PAI 対エネルギー Δ 。入力を省くと Gilbert-Cameron の値が入る。Gilbert-Cameron が Δ を計算した時用いた原子核質量公式のパラメータは古いものであり、早晚改訂されるべきものと思っているが、差し当り他に信頼の高いデータがないので、筆者は今のところ Gilbert-Cameron の値を用いている。
- (4) TI 定温度領域での温度、XNLI の指定（入力なしも含む）と a を入力すれば、GNASH は T を計算するから一般に入力の必要がない。
入力してある離散準位データに問題があるため、離散準位との接合は行なわない方がよいと判断され、かつ信頼すべき温度 T の値が与えられているような場合に入力する。フェルミガス領域と定温度領域の準位密度を滑かに接ぐためには入力可能な温度の下限がある。その値は
- $$\text{IGLCM} = 0 \text{ の時 } T_{\text{cut}} = 8/a$$
- $$\text{IGLCM} = 1 \text{ の時 } T_{\text{cut}} = 6/a$$
- である。入力した値がこれより小さないと、 T_{cut} に置き換えられる。
- (5) EMI フェルミガスと定温度準位密度の接続エネルギー。一般に入力の必要はない。
積極的にあるエネルギーで両者を接続したい時のみ入力する。この時滑らかに接ぐ条件は破れるのが普通。従って T_{cut} の制限も外される。
- (6) SIG2I スピン切断因子のエネルギー 0 の点での値を与える。この値を入力すると定温度領域では
- $$\sigma^2(E) = \sigma^2(0) + \{ \sigma^2(E_x) - \sigma^2(0) \} E/E_x$$
- で $\sigma^2(E)$ が計算される。ここで E_x はフェルミガスと定温度領域の接続エネルギー。
もし SIG2I を入力しないと、フェルミガス領域でのスピン切断因子
- $$\sigma^2(E) = CSIG \times \sqrt{a(E-\Delta)} \times A^{2/3}$$
- がそのまま定温度領域でも用いられる。ただし
- $$(E-\Delta)_{\text{cut}} = 0.5 \text{ MeV}$$
- が与えられていて、それ以下では $\sigma^2(E)$ は定数になる。筆者の経験ではこの近似で十分であり、SIG2I の入力も省いてよい。
- (7) FSI 重い核（筆者の経験では例えば ^{182}Ta , ^{198}Au ）の離散準位の積み上げを行なって見ると、指数関数型の増加を示す領域は僅かで、これに接線を引いて核温度を決定しては、相当の誤差が含まれるので避けられない。これは重い核の場合準位が密で、そのため準位の観測落ちが生ずると考えられ、その補正の方法を提案している。⁸⁾ その方法を適用してみると、準位の積み上げはスピン切断因子のエネルギー依存性と関連して指数関数よりはゆるい増加を許すことがわかる。この形を表わす因子が FSI である。FSI の値はスピン選択積み上げを行なった上で準位のフィットをしてはじめて与えられる。しかし中重核、経験的には $A \lesssim 120$ の原子核では最近の測定技術の進歩と相まって、低エネルギーでの準位の観測落ちが極めて少なくなっている。従ってこのような質量領域では上記のような補正を適用せず、FSI = 0. として差支えないようである。

FSIに入力を省けば、0が内蔵値として与えられる。重い核でのみFSIの考慮が必要と考えている。

以上をまとめると、カード9ではAIのみ、又はXNLIとAIのみを入力すればよい。ただし重い核でFSIが必要になる。なお離散準位と、連続準位密度の接続がうまくいかないとGNASHが警告を出す。この場合事情を調べて、接続が行なわれるよう改善することが望まれる。ただしこの接続が滑らかでなくとも、計算が実行されるように温度などが与えられるようになっている。従って余りこだわる必要もない。

カード10はガンマ線崩壊における強度の比を入力する。

ガンマ線の崩壊はE1, M1, E2, M2の遷移を扱うので、RE(1)からRE(4)まで、四つの因子の和が1になるように規格化して入力する。0入力で内蔵値が用いられるのは従来のGNASHと同じである。

カード11は巨大共鳴パラメータを入力する。

- (1) EG 1 巨大共鳴エネルギー(MeV)。0入力で内蔵値 $40 \cdot A^{-\frac{1}{5}}$ が用いられる。
- (2) GG 1 巨大共鳴幅(MeV)。内蔵値は6
- (3) PG 1 巨大共鳴ピーク断面積(b)。以下に説明するPG2, PG3の入力を行なわないときは、PG1も入力の必要がない。
- (4), (5), (6) EG 2, GG 2, PG 2

変形核などで巨大共鳴が二つの山に分かれる場合、第2の山のそれぞれのパラメータ。

- (7) RGG ガンマ線強度関数に $\exp \{ RGG (E_r - E_0) \}$ の形の減衰係数を乗ずる場合の係数、 E_0 にはふつう巨大共鳴エネルギーが用いられる。

カード12はピグミイ共鳴(バンプ)パラメータの入力

- (1) EG 3 ピグミイ共鳴エネルギー(MeV)
- (2) GG 3 ピグミイ共鳴幅(MeV)。負号をつけて入力すると、ピグミイ共鳴エネルギー以上では一定の強さを与えるバンプ型のプロファイルが与えられる。⁸⁾
- (3) PG 3 ピグミイ共鳴ピーク断面積(b)。負号をつけて入力すると、非弾性散乱ガンマ線の計算に進むとピグミイ共鳴は無視される。
- (4) EGCN 1 ローレンツ型のガンマ線強度関数を低エネルギー側で一定値、つまりワイスコップ型に置き換える場合がある。E1型についてこの置換をするエネルギー点の値。
- (5) EGCNM1 M1型について上述の置換をするエネルギー点。E2及びM2はすべてワイスコップ型である。

以上カード10, 11, 12はすべて核のガンマ線による崩壊のエネルギー依存にかかるものであるが、低エネルギー中性子入射での捕獲ガンマ線スペクトルを調べるような場合を除き、3枚のブランクカードを用意するだけで多くの場合問題がない。

第2表はEGNASHの入力形式の例である。表に示したのはZn-64の計算を行なう場合の入力で、普通の場合より反応形式が多く、行数がそれだけ多くなっている場合を示す。

崩壊系列にかかる核種数はNI=14を使用しており、(n, 2p)や(n, pa)反応も加えてい

るので ITC = 1 としている。出力は最も簡単な IPR = 0 としてあるが、ISO = 1 として第一励起準位生成量も出力されている。IOM = 1 でエネルギー メッシュ及び粒子透過係数はその都度計算する場合である。角分布は計算しておらず、前平衡過程と 2 本の準位に対する直接過程非弾性散乱が考慮されている。

この例は $E_n = 19.0$ 及び 20.0 MeV の二回計算するようになっているが 7 から 20 MeV まで 1 MeV おきに一度に計算しても、この質量数領域なら FACOM 780 では 3 分以内で終了する。 $(\Delta E = 0.5 \text{ MeV})$

多段階核崩壊に登場する核種は $1000 Z + A$ の大きい方から並べるとよい。崩壊の終りはガンマ線のみの放出になるから、 Z ごとに最後の核は XNIP(I) = 1. になる。 Γ_γ の値もなるべくデータを調べて入力した方がよい。

3. ELIESE 簡易版 (ELIESES)

[入力形式]

光学モデルポテンシャルパラメータとして内蔵値を用いる場合、前述のようにこのプログラムは必要がない。もし光学ポテンシャルとして評価者独自のものを用いる際は ELIESESによる透過係数の計算を予め実行し、file 27 及び 28 を作成しておく。その後 EGNASH を IOM=0 の条件で用いればよい。ここでは ELIESES の入力形式を述べる。

ELIESES は従来用いられていた ELIESE-3G の入力形式を大幅に簡略化し、粒子透過係数の計算に必要なサブルーチンのみを残したもので非常に使い易いものになっている。但し、一度入力した変数の値が保持される、same as before の機能はそのまま残してある。従って続けて異なる光学ポテンシャルを用いる場合、ブランク入力では前の値がそのまま残っていることに注意しなければならない。なお EGNASH と同じポテンシャルが内蔵されているから、粒子の種類によって、入力する光学ポテンシャルを用いたり、又内蔵値を用いたり、自由な組合せができる。なお ELIESES の実行には GNASHLIB.DAT が必要である。

入力カードは次の 3 種類のみである。

カード番号	FORMAT
1	20A 4 TITLE
2	I 5, 8 I 5 NDATA, NKIND, NUMBER, NIMAG, NOUTPT, NCHAGT, NMASST, NCHAGI, NMASSI
3	5X, I 5, 5 (A1, F 9.4) 6 R 0, RI, RS, RSO, RC 11 A 0, A 1, B, ASO 16 V, WI WS, VSO, WSO 21 VE, WIE, WSE, VSOE, WSOE 26 VESQ, WIESQ, WSESQ, VSOESQ, WSOESQ 31 VSYM

カード 1 は TITLE で 80 カラムに入力できる。

カード 2 は制御フラグである。

(1) NDATA カード 3 の入力枚数を指定する。この値は前の入力が残されない。

(2) NKIND 入射粒子の種類

1 中性子

2 陽子

3 α 粒子

4 重陽子

5 トリトン

6 ^3He

(3) NUMBER 入射エネルギーの数。最大28。エネルギー メッシュは内蔵されており、その値は第1表に示されている。表を見て、計算したい最大エネルギーに対する番号を入力する。

(4) NIMAG 光学ポテンシャル虚数部のタイプ

	体積型	表面型
1	なし	Gaussian
2	なし	der. Woods-Saxson
3	Woods-Saxson	なし
4	Woods-Saxson	Gaussian
5	Woods-Saxson	der. Woods-Saxson

(5) NOUTPT 光学ポテンシャルに内蔵値を用いるか入力するかの判別

- 0 内蔵ポテンシャルを使用
- 1 カード3に必要なパラメータを入力する。
- 2 光学ポテンシャルパラメータが、あるエネルギー点で変更されるような場合に用いる。その時前記NUMBERに変更点に対応するメッシュ数を入力する。次の計算でNOUTPT=1に戻し、NUMBERに最高エネルギーに対応するメッシュ数から先に入力したNUMBERの値を引いたものを入力する。(第1表及び第3表参照)

(6) NCHAGT 標的核の原子番号 Z

(7) NMASST 標的核の最小質量数 A_{min}

(8) NCHAGI 標的核的最大質量数 A_{max}

(9) NMASSI A_{min} と A_{max} の間のステップ数。 $A_{min} = A_{max}$ の時は1がセットされている。 A_{min} , A_{max} 及びステップ数の指定で、同じ原子番号の標的核のいくつかの同位体に対する透過係数が続けて計算できる。

カード3は光学モデルポテンシャルパラメータの入力用であり、ELIESE 3で用いられているものと同形式である。はじめに入力される6から31までの数に対応させて、R0からVSYMに至る諸パラメータを必要な所だけ入力する。前述のようにこれらの値が same as before になることに注意する。

第3表はELIESESの入力形式を示しているが、この例はプログラムの検査のために組まれたもので、特定の核種の光学ポテンシャルを入力したものではない。

まず中性子に対しては、Arthur¹⁰⁾がNiに対して提案しているパラメータを使って、⁵⁸Niと⁶⁰Niに対する粒子透過係数を計算している。ところがこの光学ポテンシャルパラメータは、En=6 MeVの点で、表面吸収項の値が変化する。このような場合はNOUTPT=2とおく。そして第1表のエネルギー メッシュを調べて、中性子エネルギー 6 MeVに対するメッシュの番号15を変数NUMBERに入力する。こうして6 MeVまではそのエネルギー領域でのWS=4.87, WSE=0.27を用いて計算される。次にWS=7.847, WSE=-0.225に変更されて、さらに9つのメッシュ点で計算されるよう0070~0090行の入力が行なわれる。この時は、これ以上のパラメータ変更はないのであるからNOUTPT=1が入力されている。

これで⁵⁸Ni の透過係数は計算が終了するが、0020行に次には⁶⁰Ni の計算をするよう指定されているから、再び元の WS 及び WSE に戻して15点の計算をし、又そこでパラメータを変えてさらに9点の計算をするよう入力されている。(0100 - 0150行)

陽子の計算は²³Ne に対し内蔵されている Perey⁴⁾ポテンシャルを適用し、NUMBER=24 つまり内蔵されているメッシュエネルギーで 35 MeVまで計算を実行する。

α 粒子では¹⁰⁴Rh 及び¹⁰⁶Rh に対し McFadden-Satchler¹¹⁾ポテンシャルにより透過係数をやはり 35 MeVまで計算する。この時 0230 - 0240行のようにパラメータが 0.の場合も必ず入力しなければならない。もし入力しないと、Perey ポテンシャルで用いた値が残されていて使用されてしまう。

重陽子においては²⁶Mg を Perey-Perey ポテンシャル¹²⁾で 35 MeVまで計算するように入力してある。 α 粒子でも重陽子でも全エネルギーに対し同じパラメータが用いられるから、NOUTPT = 1 でよい。

トリトン及び³He 粒子ではそれぞれ¹⁷O 及び¹⁶O に対し、内蔵されている Becchetti, Jr - Greenlees ポテンシャル⁷⁾が用いられ 35 MeVまで計算される。この場合 NOUTPT = 0 と入力してある。内蔵ポテンシャル使用の際はカード 3 の入力は必要でない。

4. 離散準位データの作成

EGNASHにはできるだけ正確な離散準位のデータを入力することが必要である。これを作るため、計算機のターミナルから打込んでゆくのは労の大きい仕事であり、間違いもおこりやすい。原子核の離散準位ならびにそこからの崩壊については評価ずみ核構造データファイル(ENSDF)がある。そこでENSDFから直接離散準位データを作ることができれば、作成に要する仕事量を減じ、かつ正確を期することができる。

ENSDFは原研核データセンターでファイル化されている。内容は順次改訂されて最近の評価結果が反映されるようになっているが、現在ファイル化されているものの中には必ずしも最新のものに置換えられていないものもあるようである。このファイルをプログラム“ENSDFRET”を用いて処理すると、第4表上段に示したような数値データがえられる。これは⁶⁸Znに対するものでこの場合は合計113本の準位があり、低エネルギー励起準位でのガンマ線崩壊データも与えられている。このままではEGNASHの入力には用いられないでFORMAT変換をおこない、第4表下部に示したようなデータを作ればこれが直ちにEGNASHの入力データとして使用できるようになる。

ENSDFからEGNASHのための離散準位データを作成する手順の一例を第2図に示す。上述のようにプログラム“ENSDFRET”により指定した元素に対する準位データをファイルにおとす。図の例ではCo(Z=27)からZn(Z=30)までを一括してファイルを作っており、これにLVLCOZN.DATと名付けてある。筆者の経験ではこのようにまとめてファイルを作るのは操作の回数を減じ、整理上得策と思われるが、一元素ごとにファイル化した方が、後の処理では便利のようである。ところでLVLCOZN.DATにはCo, Ni, Cu, Znのほとんどの同位体の準位データがすべて収納されている。ENSDFには励起エネルギーが与えられている準位はすべて含まれているようで中には100を超す準位が与えられる。しかしこのデータをそのままEGNASHに用いることは全く不都合であり、比較的正確なデータの与えられている準位までにとどめねばならない。この判定基準が2つある。

(1) 低励起準位は一般に核の定温度模型に従って配列していると考えられている。そこで準位の積み上げ図を書いて定温度配列の上限を調べる。それ以上では準位の観測落ちがあると考え、使用を避ける。

(2) 準位のスピルベリティの値及びその準位からのガンマ線崩壊の分岐比が与えられていること。もしこの基準を厳格に適用すると、極めて小数の準位データしか残らない例が少くない。全くガンマ線崩壊データの与えられていない核種もあるから、そのままでは準位データができない。そこで小数の準位のスピルベリティの値を与えたり、ガンマ線崩壊系列を仮定したりして、離散準位データを作成しなければならないこともある。

準位の積み上げ図は“ENSDFRET”で作ったデータから、プログラム“LVLPLT”を用いて画くことができる。しかしフロッピーディスクに収納し持ち帰ってPC-9801を使って画くこともできる。その場合、筆者作成の“WINGLVL.EXE”を起動する。先ず入力データを要求し

てくるので例えば LVLCOZN. DAT と打ち込み、次に出力ファイル名として、WLZN. PLT と指定する。これは Zn のデータプロットをする場合であるので、次に△30062 及び△30071 (FORMAT 2I6) と入力すると⁶²Zn から⁷¹Zn までのプロット用データが作られる。このデータを使ってプログラム “WING” によってプロットした⁶⁸Zn の例が第 3 図に示されている。図によるとレベル数40位まで定温度状の積み上げが認められる。(GNASHでは基底状態を準位 1 と数えるので、励起準位を 1 から数える場合と数が 1 つずれる。原研での準位プロットは基底状態を 0 としている)

次に EGNASH 用の離散準位データを作るため、FORMAT 変換をするコード “LVLCON. EXE” を起動する。この場合も入力ファイル名 LVLCOZN. DAT と出力ファイル名 GLZN. CON を打ち込む。計算は一つの元素ごとに行なう。そこで次に変換する Zn の同位体数を FORMAT I 3 で入力する。例えば⁶²Zn から⁷¹Zn までを同時に実施する場合には△10 を打ち込む。次は同位体ごとのレベル数とその $1000 \times Z + A$ を要求してくるので一行ずつ FORMAT I 3, I 6 で入力してゆく。この場合 10 行入力するのである。⁶⁸Zn の行では△35△30068 と打ち込む。ここで準位数を 40 ではなく 35 にしたのは EGNASH での離散準位の最大数が 35 に制限されているからである。

こうして出来た第 4 表下段に示すものは 35 番までの準位データが作られるが、表を見ると早くも 6 番と 8 番の準位のスピン、パリティが与えられておらずたんに N と記されている。又ガンマ線の崩壊データのないものもある。もし前述の第 2 の基準に従うと、5 番目までの準位データしか使えない。第 3 図で見るとせめて 8 番までの準位データを用意することが望ましい。そのため周囲の準位のスピンパリティの値とその崩壊の模様を観察し、第 6 及び第 8 準位にそれぞれ +4.0 及び +0.0 のスピンパリティの値を与えることにする。こうして 9 番目以上の準位を削除すれば、第 8 準位までの完全なデータが出来上ったことになる。

⁶⁸Zn の場合 ENSDF には NL 0 = 113 の準位が含まれていたが、積み上げプロットと EGNASH の制限から NL 1 = 35 が選ばれ、最後に準位のスピンパリティ及びガンマ線崩壊データを整える観点から NL 2 = 8 となった。このような操作を Zn の全同位体に適用し、最後に GNASH 用の離散準位データ ZN. LVL が完成する。筆者はこの編集を “WORD STAR” を用いて実行している。第 6 表にはおのおのの核種でいくつの離散準位が EGNASH で使われたか Nc という数で表わしている。この Nc がここで用いた NL 2 とほとんどの場合等しい。中には Nc を NL 2 以下に選んだものもある。

5. DWUCK 改良版 (DWUCKY)

DWUCK4 コードは核データセンターで改良され、中性子非弾性散乱専用のものが用意された。このコードをさらに原研千葉により「修正版 DWUCK4 の修正」(1986. 10. 30) が実施され、入力エネルギーが任意に選ばれるようになっている。ここでは SINCROS-I に組込むために、次に述べる数点の改正を行った。以下この改正をしたものと略称する。

- (1) EGNASH 及び ELIESSES に組み込まれている中性子用光学ポテンシャル(modified Walter-Guss ポテンシャル)を内蔵させた。原研での改良作業により既に Wilmore-Hodgson⁽³⁾ ポテンシャルが内蔵されており、FZZ = -15.0 とおくとこのポテンシャルが用いられるようになっている。これにならって FZZ = -20.0 と入力すると Walter-Guss ポテンシャルを用いて計算が進められるようにしてある。
- (2) 直接過程断面積の規格値を与えるため、従来偶一偶核では β_ℓ^2 、奇数核では準位のスピンの値を考慮して求められる $\beta_\ell^{2'}$ を入力していた。ふつう変形パラメータのデータ集には直接 β_ℓ が与えられているので、今回のプログラム修正では、偶一偶核では β_ℓ を、奇数核では β_ℓ と準位のスピンの値を入力するようにした。プログラム内で β_ℓ^2 又は $\beta_\ell^{2'}$ が計算される。
- (3) 標準的な使い方の場合、16個ある制御用フラグはブランク入力でよい。ただし断面積角度分布のルジャンドル係数を求めたいときは ICON(14) = 2 とおく。
- (4) 断面積を計算するエネルギー点の内蔵値は削除したので、必ず必要な点だけ入力する。最大30点。
- (5) 準位ごとの断面積励起関数及びエネルギー点ごとの角度分布(二重微分断面積)がすべて file 33 に格納される。これは EGNASH での励起関数ならびに二重微分断面積の計算に利用される。

内蔵ポテンシャルを利用する場合の入力形式を以下に説明する。評価者独自のポテンシャルを用いる場合の入力は従来の DWUCK4 による。

カード番号	FORMAT	変 数
1	16 I 1, I 4, 15 A 4	ICON, MAT, ALPHA
2	I 8	NEN
3	10 F 8.0	(ENERG(K), K = 1, NEN)
4	12 I 3	NLVL (MTNO(I), I = 1, NLVL)
		N = 1, NLVL (カード 5 の繰返し)
5	10 F 8.4	QVAL(N), ANGTRF(N), FNORM(N), SPINF(N)
6	10 F 8.4	DRF, RZ, RMAX
7	10 F 8.4	E, FM(1), Z(1), FMA(1), ZA(1)
8	10 F 8.4	FZZ (IP, 1)
9	10 F 8.4	E, FM(2), Z(2), FMA(2), 2 A(2)

10	10 F 8.4	FZZ (IP, 2)
11	10 F 8.4	E, FM(3), Z(3), FMA(3), ZA(3)
12	10 F 8.4	FZZ (IP, 3)
13	16 I1, I4, 15 A 4	ICON, MAT, ALPHA

カード 1 は制御フラグ, MAT 数, タイトルの入力

- (1) ICON 16個の制御フラグが並んでいる。すべて DWUCK4 と同じ。SINCROS-I で標準的使用の場合ブランク入力でよい。ICON(14) = 2 とおくと角度分布のルジャンドル係数が計算される。
- (2) MAT MAT 数で, これに 0 以外の数を入力すると ENDF/B フォーマットの出力が file 10 に格納される。
- (3) ALPHA タイトルで 60 文字入力できる。

カード 2 は入射エネルギーの点数

- (1) NEN 入射エネルギーの数で最大 30

カード 3 は入射エネルギーの値

- (1) ENRG 入射エネルギーの値 (実験室系)。直接過程断面積を計算する励起エネルギーの最低値から始め, 3 MeV 位までは間隔を 0.25 ~ 0.5 MeV にとり, それ以上では次第に間隔を拡げながら必要な最高エネルギーまで。ふつう 20 点以下で十分である。

カード 4 は準位の数とそれらの MT 数

- (1) NLVL 直接過程非弾性散乱断面積を計算する準位の数。最大 20
- (2) MTNO それぞれの準位の非弾性散乱に対する MT 数。51 ~ 90 の間の数

カード 5 は準位の Q 値, 角運動量遷移量など

- (1) QVAL 準位の Q 値 (負号)
- (2) ANGTRF 角運動量の遷移量 $\Delta \ell$
- (3) FNORM 変形パラメータ β_ℓ
- (4) SPINF 奇数核のとき準位のスピンの値。偶一偶核では入力の必要がない。

カード 6 は数値積分ステップ量など

- (1) DRF 積分ステップ量 0.1 に設定
- (2) RZ 半径方向積分の lower cutoff 0.1 に設定
- (3) RMAX 半径方向積分の upper cutoff 30 に設定
上記の値が内蔵されているのでブランク入力でよい

カード 7 は標的核質量数と原子番号

- (1)~(3) E, FM(1), Z(1) はすべて不要でブランク。
- (4) FMA(1) 標的核の入射チャネルにおける質量数 A。
- (5) ZA(1) 同じく原子番号 Z。

カード 8 は光学ポテンシャルの指定

- (1) FZZ(1) 入射チャネルの光学ポテンシャル形式の指定
SINCRO-I では -20. を入力する。

カード9及び11はカード7と同様で、それぞれ出口チャネル及びフォーム因子計算のための質量数と原子番号であり、非弾性散乱の場合カード7と同じ値を入力すればよい。

カード10及び12はカード8と同じく、それぞれ出口チャネル及びフォーム因子計算のための光学ポテンシャルの指定であり、ここではいずれも-20.を入力する。

カード13はカード1と同じで始めて戻る。ここでICON(1)=9と入力すると計算が終了する。別の計算を引き続き反復することが可能であるが、現在結果をfile33に格納する場合前後の区別ができるようになっていないので、核種ごとに計算をすることが必要である。

入力形式の一例を第5表に挙げておく。なおDWUCKYにもGNASHLIB, DATAが必要である。

6. 核断面積計算の標準的手順と計算結果

2～5章でSINCROS-Iに用いられている個々のコードについて述べたので、この章ではこれらのコードを用いて核断面積を計算する場合の標準的な手順を説明し、最後に今まで筆者が実施した断面積計算結果のいくつかを例示する。

6.1 核断面積計算手順

SINCROS-Iを用いて核断面積を計算するときの、標準的な手順が第4図のフローチャートで示されている。

まず4章で述べた方法で核の離散準位データが作られる。将来の荷電粒子反応や、20 MeV以上の中性子反応の計算をする場合に備えて、当面不要でもできるだけ多くの核種を対象として作業をしておいた方がよい。

次にこれらの準位の中で、強い直接過程を経て作られるものについて、5章に述べた手法で非弾性散乱断面積とその角度分布を計算する。回転レベルを含まぬ場合には、SINCROS-Iでは簡易な入力を用意してあるのでこの計算も必ずしも実行する。その際用いる変形パラメータ β_2 については偶一偶核の場合 Raman 等¹⁴⁾の編集値が参考になる。 β_3 は経験的に $(0.7 \sim 1.0) \times \beta_2$ の値でよいと思う。その他陽子の非弾性散乱から求めたものや、Nuclear Data Sheetsの中の B(E2) の値が手がかりを与える。

上述の準備で作られた離散準位データ(file 8)と直接過程非弾性散乱断面積(file 33)を入力していよいよ EGNASH の予備計算に入る。実験データが比較的多く、かつ計算の中で前平衡過程が断面積の20～40%を占める、中性子エネルギー14～15 MeVを選ぶ。計算を進める上で必要な未知パラメータを次のように仮定する。

(1) 前平衡過程のパラメータ F2

第7表を参照して決める。前平衡過程の強さは、はじめの複合核の準位密度パラメータを a_c とすると $F2 \times a_c^4$ に逆比例する。従って a_c とともに決定すべきもので今のところはっきりした選択の基準がない。標的核原子番号の奇偶に若干の関連があるようである。むしろ第7表に挙げた前平衡過程の占める割合が参考になる。

(2) 放射幅 Γ_r

ガンマ線の遷移確率は $T_r = 2\pi\Gamma_r/D_0$ で決まるから、 Γ_r の値を中性子共鳴データから引用して入力する。ただしはじめの複合核だけは Γ_r の値を数分の1に減じて入力する方が良い。その方が捕獲断面積の計算結果が実験値に近くなる。 T_r の値を後からもう一度見直すので経験的に決めてよい。

(3) 準位密度パラメータ a

ここで実施しようとしている予備計算の目的は崩壊系列に現われる総ての核種の妥当な a の一組を見出すことにある。いくつかの核で S 波共鳴レベルの平均間隔 D_0 が測定されているから、

この $D_0 \pm \Delta D_0$ に対応する $a \pm \Delta a$ を計算できる。できるだけこの a の値は尊重するけれども、断面積の計算結果が思わしくないときはこだわらずに変更する。第 6 表に筆者が定めた a の値がある。これを質量数 A に対しプロットして見ると、第 5 図、第 6 図のようにある程度の系統性がつかめる。

以上のような点を考慮して定めた a の一組を使って計算した結果を (n, p) , (n, α) , $(n, 2n)$ 反応、あるいは全生成量を示す (n, xp) , $(n, x\alpha)$ 反応などの断面積の実験値と比較し、総ての実験データを参照しつつ、それぞれの誤差範囲におさまるか否か調べる。そして例えば (n, α) 反応断面積が小さいときは、 (n, α) 反応の娘核の a を増すか、標的核の a を減ずるか調節する。こうして多くの実験結果を満足する a の一組を見出す。ところで実験データにも相当の系統誤差を含むものがあるから、この段階での計算結果と比較検討しながらデータの良否を見抜くことが必要である。断面積計算の過程で最も重要な段階であって、評価者の腕の見せ所でもある。

計算はここから第 2 段階に入り、仮定したパラメータの検討に入る。パラメータ β_ℓ 及び F_2 は中性子の放出スペクトルから妥当性が調べられる。普通中性子スペクトルの実験は同位体ごとに実施されていないから、計算の方では同位体ごとの計算結果を合成して比較する。その合成する前に同位体ごとのスペクトルの特徴なども心にとめておく方がよい。例えば ^{58}Ni と ^{60}Ni ではスペクトルの硬さがかなり異なる。比較して β_ℓ , F_2 に修正の必要が認められれば、フローチャートに示したような繰返し計算が必要になる。なお F_2 の値は中性子スペクトルの硬さを変え、結果として $(n, 2n)$ 反応断面積が変わる。それ故、中性子スペクトルとともに $(n, 2n)$ 反応断面積も F_2 の調節の目安になる。

次にガンマ線遷移率 T_γ の決定のためにコード CASTHY を動かす。先ずそのため EGNASH で CASTHY への入力に必要なパラメータの値を出す。それは光学ポテンシャルパラメータの数値と競走断面積である。そのため 2 章で説明したカード 3 のフラグのうち $IOM=2$, $ICAPT=1$ において EGNASH を $0.5 \sim 6 \text{ MeV}$ の範囲で計算する。エネルギー範囲の下限は直接過程断面積の寄与の始まるエネルギーとして選ばれ、又上限は核反応において 2 粒子放出のおこらないエネルギーの上限付近としてとったものである。従ってこの計算は反応にかかる原子核の数 $NI=4$ の小数ですむ。競走断面積の値も出力されるよう最近改められてるので、この計算の出力プリントから CASTHY に入力すべき総ての数値がえられる。

CASTHY はエネルギー範囲として熱中性子から 6 MeV までを適宜選んで計算する。このとき $NIMAG=2$ でよい。Walter-Guss ポテンシャルは 6 MeV まで体積型吸収は 0 だからである。捕獲断面積の実験データの中から信頼のおけるものを選んでエネルギー点とそこでの実験値を入力する。こうして規格因子として T_γ の値と、 6 MeV までの捕獲断面積ならびに非弾性散乱断面積がえられる。実験データがあれば、得られた捕獲ならびに非弾性散乱断面積を比較してみよう。満足のえられない結果なら、ガンマ線の強度関数の形や、捕獲と非弾性散乱との競走を決めるパラメータ、例えば標的核の準位密度パラメータなどを考慮しつつ、CASTHY の再計算を実施する。第 4 図で点線で示したように、必要があれば DWUCK の計算まで戻ることもあるかもしれない。しかし以上の諸計算は総てモデル化とパラメータ表示による近似的な断面積の表示であることを考え実験との一致に余り神経質になることはない。むしろ余裕のある取り組み方が好結果を生むし、経験の蓄積によって見透しが良くなってくる。

こうしてパラメータ, β_ℓ , F2, Tr ならびに一組の a の値がえられたならば, いよいよファイル化のためのランに入る。この際も筆者はエネルギー領域を 2 つに分け

- (1) thermal - 6 MeV ICAPT = 1, NI = 4
- (2) 6 - 20 MeV ICAPT = 0, NI = 7 ~ 10

として計算している。もし角度分布も計算する場合は IANG = 1 とする。又核異性体断面積を知りたいなら ISO に必要な数を入力するなどのことが必要である。エネルギー・メッシュ幅 ΔE は変えない方がよい。但し, ガンマ線スペクトルを実験データと比較するとき, ΔE を小さくとって計算して見ると, 低エネルギーでの線スペクトルとの対応がわかり易くなる。

EGNASH の計算結果は file 44 に保存し, これを GAMFIL²⁰⁾ コードを用いて ENDF-B FORMAT に変換する。その手続きをここで述べる必要はないであろう。

6.2 核断面積計算結果の実例

簡易標準化された計算システム SINCROS-I を用いると, 核断面積計算の作業効率を非常に向上させることができる。筆者はこのシステムの開発に当たると共に, これを用いた中性子反応断面積の計算を進めてきた。1988 年 3 月の時点で以下の 25 核種の 1 - 20 MeV における断面積計算が終了している。今後もパラメータの値を変更して計算結果の改善をはかる必要のあるものも含まれているが, 一応の結果は直ちに提示できる。

中性子断面積 (1 - 20 MeV)

¹³ Al	27
²⁷ Co	59
²⁸ Ni	58, 60
²⁹ Cu	63, 65
³⁰ Zn	64, 66, 67, 68, 70
⁴⁰ Zr	90, 91, 92, 94
⁴¹ Nb	93
⁴² Mo	92, 94, 95, 96, 97, 98, 100
⁴⁷ Ag	107, 109

以上の核種については核異性体生成断面積も含めて, GNASH で出力されるすべての断面積の計算値がある。これらの結果で実験データと比較できる図表は 50 を超えるので, 本解説の付録としてまとめることにした。ここではこれまでの計算のまとめとして, Co から Zn ならびに Zr から Mo の領域での計算によって決定された準位密度パラメータの質量数依存性を示し, 又 15 MeV での水素及びヘリウムの生成断面積の実験との比較を行なうこととする。

Mn から Zn までの準位密度パラメータの質量数依存性は第 5 図に, Sr から Mo までのそれを第 6 図に示した。第 5 図の場合 Ni, Cu, Zn の多くは中性子共鳴実験で決まる D_0 から計算した a の値にかなり近い。Mo も同様である。それらの核が崩壊してできる娘核の a は D_0 から算出されるものと比較して少し高い値を示すようになる。いずれにしても shell 効果が顕著である質量数 90 以下を除くと, 元素ごとにかなり直線的变化をしていることがわかり, 非常に興味深い。

これだけのデータからパラメータ a の系統性を云々するのは時期尚早であるが、変化の傾きの質量依存性などがわかってくると計算に使用する a の初期値が推定しやすくなろう。 a の数値及び連続準位に接げる離散準位の番号及びそのエネルギーは第6表にまとめた。今後改訂されるものもあるう。

第7表は前平衡過程パラメータ F_2 (Kalback 定数の $1/100$) の値を示した。元素の Z が奇数のとき F_2 の値が小さく、偶数のときやや大きい傾向があるが、今の所 F_2 をどうとてよいか決定が難しい。(表中 ^{90}Zr が他の Zr 同位体と F_2 の値が異なるが、すべて同じにして再計算するつもりである。) 参考までに $E_n = 15 \text{ MeV}$ の点ですべての前平衡過程断面積を加え、これを複合核形成断面積で割って見た。これが表の $\sigma_{\text{pretot}} / \sigma_{\text{compound}}$ である。 F_2 の値がかなり違ってもこの比がほとんど同じ場合がある。従って F_2 は単なる調節のパラメータであって前平衡過程の大きさの目安にはならない。同位体では質量数が増すに従ってこの比が減少する。例えば Mo を見るとそのことがよくわかる。一方 15 MeV での Mo 同位体の (n, p) 及び $(n, 2n)$ 断面積をプロットしてみると第7図がえられる。 $(n, 2n)$ の増加は放出中性子スペクトルが軟くなることを示しているから、前平衡過程が減少することになる。 (n, p) 反応での前平衡過程も減る。こうして $\sigma_{\text{pretot}} / \sigma_{\text{compound}}$ の減少とこれらの断面積の変化は当然相関をもつ。

次に第8表及び第9表に $E_n = 15 \text{ MeV}$ における水素及びヘリウムの生成断面積を実験データと比較したものを挙げる。水素については Grimes らのデータを参照した。Grimes らのデータは $(n, x\alpha)$ 断面積において Kneff ら¹⁹⁾ のものと比べやや小さくでているところから (n, xp) も小さいと予想される。従って文献15), 16), 17) に示されている実験データより、今回の計算値がいずれも少し大きくなっていることはむしろ妥当なものと判断できる。しかし Haight らの論文¹⁸⁾ から引用した値はすべて計算値より高い。Haight らの与えた $(n, x\alpha)$ 断面積が Kneff らの値に比べて高いところから、おそらくなんらかの系統誤差によって過大な実験結果を与えたのではないかと考えることができる。

ヘリウム生成断面積はすべて Kneff らの実験結果と比較された。第9表に見るよう実験と計算の一一致は極めて良い。ただ元素の値のうち Zr の計算結果が実験値の2倍近い値を与えている。 Zr のヘリウム生成断面積の計算は見直しが必要である。いずれにせよ、本システムで実施された計算結果の信頼性はかなり高いものであることは明らかである。

最後に EGNASH 出力の中に断面積一覧表を加えたことを述べよう。かねてから GNASH 出力には個々の核崩壊にかかる断面積は表示されていたが、 (n, p) や (n, α) 反応断面積はそれらの量から改めて加算、減算をして求めねばならぬ不便さがあった。又核異性体断面積を知るには、多くの準位生成断面積の中から該当するものを選び出さねばならなかった。多くの計算結果を処理する上でこれは大変非能率であったので断面積一覧表の出力をえるようプログラムの改良が実施された。第10表はその一例で、 $^{58}\text{Ni} + n$ 反応を $15 - 20 \text{ MeV}$ で計算した場合のものである。まず COMPOUND, PRODUCTSUM, DIRECT, COMPETITION の四つの断面積が出力される。このうち PRODUCTSUM は生成されるすべての核種の基底状態生成断面積の和で、核異性体の状態から β 崩壊などによって基底状態へ落ちぬような遷移がある場合を除いて、COMPOUND, つまり複合核形成断面積に一致すべきものである。しかし表に見るよう数%の減少があるのは、核のガンマ線遷移を連続的に行なわず、ビンの幅 ΔE づつ計算しているため

はないか、又連続準位と離散準位との接ぎのところなどで損失が起るのではないかと想像している。DIRECTは直接過程非弾性散乱断面積の合計を表わし、又COMPETITIONはCASTHYコードに入力すべき競走断面積の値を示している。その下にこの競走断面積に対するコメントがある。

それ以下に順次基底状態及び第一励起状態の核種ごと生成断面積が出力される。第二励起状態及び変数 ISOへの入力値によって必要とする準位に対する生成断面積が出力されることは既に第2章で述べた通りである。核異性体遷移の型によって基底状態生成断面積がそれに対応する反応断面積に等しい場合と、反応断面積より小さい値を示す場合がある。

反応断面積一覧表の出力は、計算結果の迅速な理解と判断を可能にし EGNASH利用者に極めて有用なものである。

7. あとがき

GNASHなどのHauser-Feshbach理論を使った核断面積計算コードをマスターし、かつ良い計算結果をえるまでにはかなりの労力と経験を要する。多くの断面積を計算するためには、もっと気楽にアクセスできる計算コードが必要ではないか。筆者自身に芽生えたこうした要求に応えようと、簡易入力核断面積計算システムの編成に取り組んで一年有余、ようやく実用に耐えるシステムができ、これを用いて25核種に対する中性子断面積の計算が1-20 MeVのエネルギー範囲でほぼ完了した。そこでこのシステムをより多くの人に利用してもらうことを目的として、システムの構成や入力形式を解説したのが本報告である。従来のGNASHに比べれば、非常に使い易くなっていることは、比較的短期間に相当数の断面積計算を筆者が実行できたことで証明されていると思う。今日までに取りまとめられたものを第Ⅰ版として出版する所以である。

しかしながらこれから初めて核断面積を計算する人々にとって果して簡便でありうるかを考えると、必ずしもそうなっていない。離散準位データの用意には時間要するし、直接過程非弾性散乱断面積を計算するときの変形パラメータ β_ℓ の値を如何に選ぶかなど。(ただし偶一偶核の β_0 には推奨値がある) そして現在最も問題なのは準位密度パラメータ “a” の決定であり、そのためには断面積の計算に若干の熟練が要求される。この他、前平衡過程パラメータ F2 の選定がある。これらについては本文中で筆者の考えを述べてあるから参照してほしい。

以上の問題に対するもっと組織的な解決法をまとめると

- (1) 異散準位データについては、ENSDFの整備が進んでいることと相まち、これを利用した適当な協力作業を行なえば、解決は可能である。
- (2) 最近では 14 MeV 中性子による DDX の実験データが多くある。この角度積分データとの比較で β_ℓ と F2 に対するかなり精度の良い選定が可能である。系統性を論ずるのは後のことにする。従ってこれも協力作業が必要である。
- (3) 約 100 核種の準位密度パラメータ “a” の推奨値を筆者は25核種の断面積計算に際し定めた。ところで “a” の値は使用している光学モデルポテンシャルに依存する。ここでは EGNASH 内蔵ポテンシャルをすべての場合用いているので、一つの閉じたパラメータの組みができるうことになる。このポテンシャルの差し当っての適合範囲を Z=20-120 と考えているので、F から Sn 位までの比較的実験データの揃った核種について計算が進められると、300 核種位の準位密度パラメータ “a” の一組が与えられる可能性がある。

こうして定められた諸パラメータの値をデータ文としてプログラムに加え、核断面積計算に際してはこれを初期値として用い、その結果を実験値と比較して補正を加えることのできるようなシステムを作れば、断面積計算の経験の乏しい研究者であっても直ちに目的とする値が求められる。このような特別簡便な核断面積計算コードを目標(或いは夢)として設定しておくのも有意義と感ぜられる。

最後に EGNASH をもっとエネルギーの高い中性子や荷電粒子反応に用いる場合の問題点についてふれておこう。既に SINCROS-I でも扱える核の数は 20 まで増してあるので、多少の問題点

を無視すれば、中性子エネルギー50 MeV位まで計算できる。問題点の一つは光学モデルポテンシャルの適合範囲である。例えば陽子のためのPerey ポテンシャルは9-22 MeV の実験データを参照して定めてあるから、それ以上のエネルギーの陽子について保証はない。 α 粒子のポテンシャルも同様である。筆者は今50 MeV ないしそれ以上のエネルギーでの中性子及び荷電粒子反応断面積の計算コードの開発に取り組みはじめたが、その際 Perey ポテンシャルは25 MeV 以上で陽子反応全断面積を過小評価している感触をえている。従って50 MeV 用計算システム(SINCROS-II)では新しい陽子用のポテンシャルが必要の様である。このことからSINCROS-I のエネルギー適用範囲の上限は約30 MeV と考えられる。

本システムをまとめに当っては原研核データセンターの浅見、中川、成田の諸氏、日本原子力事業総合研究所肥田氏らに主に計算機実行上の諸手続について教えていただいた。紙面を借りて感謝の気持ちを表わしたい。

参 考 文 献

- 1) S. Igarashi, "Program ELIESE-3; Program for Calculation of the Nuclear Cross Sections by Using Local and Non-Local Optical Models and Statistical Model, JAERI 1224 (1972).
- 2) P.G. Young and E.D. Arthur, "GNASH: A Preequilibrium, Statistical Nuclear-Model Code for Calculation of Cross Sections and Emission Spectra", LA-6947, Los Alamos National Lab. (1977).
- 3) R.L. Walter and P.P. Guss, "A Global Optical Model for Neutron Scattering for $A > 53$ and $10 \text{ MeV} < E < 80 \text{ MeV}$ ", Proc. Int. Conf. Nuclear Data for Basic and Applied Science, Santa Fe, New Mexico, p.1079 (1985).
- 4) F.G. Perry, Phys. Rev., 131, 745 (1963).
- 5) O.F. Lemos, "Diffusion Elastique-de Particules Alpha de 21 a 29.6 MeV sur des Noyaux de la Region Ti-Zn", Orsay Report, Series A, No.136 (1972).
- 6) J.M. Lohr, W. Haeberli, Nucl. Phys., A232, 381 (1974).
- 7) F.D. Becchetti, Jr. and G.W. Greenless, "Polarization Phenomena in Nuclear Reactions", p.682, The University of Wisconsin Press (1971).
- 8) N. Yamamuro, K. Udagawa and T. Natsume, Nucl. Sci. Eng., 96, 210 (1987).
- 9) S.F. Mughabghab, M. Divadeenam and N.E. Holden, Neutron Cross Sections, Vol.1, Neutron Resonance Parameters and Thermal Cross Sections, Part B $Z = 61 - 100$, p.21 (1981).
- 10) E.D. Arthur, "Calculations of High Energy Proton and Neutron Reactions on $^{58,60,62}\text{Ni}$ ", Applied Nuclear Science Research and Development Progress Report, June 1, 1985 - November 30, 1985, LA-10689PR (1986).
- 11) L. McFadden and G.R. Satchler, Nucl. Phys., 84, 177 (1966).
- 12) C.M. Perey and F.G. Perey, Phys. Rev., 132, 755 (1963).
- 13) D. Wilmore and P.E. Hodgson, Nucl. Phys. 55, 673 (1964).
- 14) S. Raman, C.H. Malarkey, W.T. Milner, C.W. Nestor, Jr. and P.H. Stelson, Atomic Data and Nucl. Data Tables, 36, 1 (1987).
- 15) S.M. Grimes, R.C. Haight and J.D. Anderson, Nucl. Sci. Eng. 62, 187 (1977).

- 16) S.M. Grimes, R.C. Haight, K.R. Alvar, H.H. Barschall and R.R. Barchers, Phys. Rev. C19, 2127 (1979).
- 17) S.M. Grimes, R.C. Haight and J.D. Anderson, Phys. Rev. C17, 508 (1978).
- 18) R.C. Haight, S.M. Grimes and R.G. Johnson, Phys. Rev. C23, 700 (1981).
- 19) D.W. Kneff, B.M. Oliver and H. Farrar IV, Nucl. Sci. Eng., 92, 491 (1986).
- 20) 肥田和毅, GAMFIL : ガンマ線生成核データファイル作成プログラム,
JAERI-M 86-150 (1986).

第1表 ELIESES に内蔵されているエネルギー メッシュ

単位 (MeV)

番号	中性子	荷電粒子
1	0.01	0.05
2	0.025	0.1
3	0.05	0.25
4	0.1	0.5
5	0.25	0.75
6	0.5	1.0
7	0.75	1.5
8	1.0	2.0
9	1.5	2.5
10	2.0	3.0
11	2.5	3.5
12	3.0	4.0
13	4.0	5.0
14	5.0	6.0
15	6.0	7.0
16	7.0	8.0
17	8.0	10.0
18	10.0	12.0
19	12.0	14.0
20	14.0	16.0
21	16.0	20.0
22	20.0	25.0
23	25.0	30.0
24	30.0	35.0
25	35.0	40.0
26	40.0	45.0
27	45.0	50.0
28	50.0	55.0

EGNASH にも同様のエネルギー メッシュが組み込まれている。

第2表 EGNASH入力形式

ZN-64 + NEUTRON REACTION (ELIESE-GNASH JOINT PROGRAM EGNASH)
 1988 02 19 N. YAMAMURO

14	0	1	1	0	0	0	1	2	0	1
1.		30064.		0.5		1.2				
0.										
	2									
19.0		20.0								
30065.	5.		0.18			2.26E-04				
	10.1									
30064.	4.		0.73							
	10.0									
30063.	4.		0.73							
	9.4									
30062.	1.		0.73							
	9.1									
29064.	4.		0.50							
	10.0									
29063.	4.		0.50							
	9.5									
29062.	1.		0.50							
	9.3									
28063.	2.		2.0							
	9.4									
28062.	1.		2.2							
	9.0									
28061.	3.		1.7							
	8.5									
28060.	3.		1.7							
	8.1									
28059.	1.		1.7							
	7.6									
27060.	2.		0.56							
	9.7									
27059.	1.		0.56							
	8.7									
0.										
0.										
0.										

第3表 ELIESES入力形式

0010	NICKEL		ARTHUR POTENTIAL FOR NEUTRON					
0020	4	1	15	5	2	28	58	60 2
0030		6	1.287		1.287		1.345	1.12
0040		11	0.56		0.56		0.47	0.47
0050		16	50.06		-0.0941		4.87	6.2
0060		21	-0.3721		0.197		0.27	0.
0070	2		9		1			
0080		18	7.847					
0090		23	-0.225					
0100	2		15		2			
0110		18	4.87					
0120		23	0.27					
0130	2		9		1			
0140		18	7.847					
0150		23	-0.225					
0160	NEON		PEREY POTENTIAL FOR PROTON					
0170	0	2	24	2	0	10	23	23
0180	RHODIUM		MCFADDEN-SATCHLER POTENTIAL FOR ALPHA-PARTICLE					
0190	5	3	24	3	1	45	104	106 2
0200		6	1.444		1.444		0.	0. 1.3
0210		11	0.548		0.548		0.	0.
0220		16	175.4		31.7		0.	0.
0230		21	0.		0.		0.	0.
0240			31 0.					
0250	MAGNESIUM		PEREY-PEREY POTENTIAL FOR DEUTERON					
0260	4	4	24	2	1	12	26	26
0270		6	1.15		0.		1.34	0. 1.15
0280		11	0.81		0.		0.68	0.
0290		16	89.1		0.		14.4	0. 0.
0300		21	-0.22		0.		0.24	0. 0.
0310	OXYGEN		BECCETTI,JR-GREENLEES POTENTIAL FOR TRITON					
0320	0	5	24	3	0	8	17	17
0330	OXEGEN		BECCETTI,JR-GREENLEES POTENTIAL FOR HE-3					
0340	0	6	24	3	0	8	16	16

第4表 ENSDFから作成した離散準位データとGNASH入力形式への変換

30068
 ADOPTED LEVELS, GAMMAS
 30068 113

0.0	0.0	+	0.0	0
1.0774E+00	2.0000+		1.5700E-12	1
	1	1.0773E+00	1.0000E+00	
1.6559E+00	0.0	+	0.0	2
	2	5.7854E-01	1.0000E+00	
	1	1.6590E+00	0.0	
1.8831E+00	2.0000+		1.6000E-12	3
	3	2.2730E-01	2.6054E-04	
	2	8.0575E-01	3.9384E-01	
	1	1.8831E+00	6.0590E-01	
2.3384E+00	2.0000+		0.0	2
	2	1.2610E+00	9.8328E-01	
	1	2.3380E+00	1.6716E-02	
2.3703E+00	0.0	N	0.0	1
	2	1.2929E+00	1.0000E+00	
2.4175E+00	4.0000+		0.0	2
	4	5.3422E-01	5.5688E-03	
	2	1.3400E+00	9.9443E-01	
2.5102E+00	0.0	N	0.0	1
	2	1.4328E+00	1.0000E+00	
2.7507E+00	3.0000-		4.2000E-13	3
	5	4.1241E-01	7.1495E-02	
	2	1.6733E+00	9.2851E-01	
	1	2.7510E+00	0.0	

30068 35

1	.0000	+	.0	0
2	1.0774	+	2.0	1
	1	1	1.000	1.00
3	1.6559	+	.0	2
	1	2	1.000	1.00
	2	1	.000	1.00
4	1.8831	+	2.0	3
	1	3	.000	1.00
	2	2	.394	1.00
	3	1	.606	1.00
5	2.3384	+	2.0	2
	1	2	.983	1.00
	2	1	.017	1.00
6	2.3703	N	.0	1
	1	2	1.000	1.00
7	2.4175	+	4.0	2
	1	4	.006	1.00
	2	2	.994	1.00
8	2.5102	N	.0	1
	1	2	1.000	1.00
9	2.7507	-	3.0	3
	1	5	.071	1.00
	2	2	.929	1.00
	3	1	.000	1.00

第5表 DWUCKYの入力形式

AL-27 DIRECT INELASTIC SCATTERING CROSS SECTIONS									
0010									
0020	17								
0030	0.8438	1.0	1.25	1.5	1.75	2.0	2.5	3.0	4.0
0040	6.0	8.0	10.0	14.0	18.0	25.0	32.0		5.0
0050	5	51	52	53	54	55			
0060-0.8438	2.		0.44	0.5					
0070-1.0144	2.		0.41	1.5					
0080-2.2111	2.0		0.40	3.5					
0090-2.7348	2.0		0.25	2.5					
0100-3.004	2.0		0.37	4.5					
0110	0.								
0120			27.0	13.0					
0130-20.			27.0	13.0					
0140			27.0	13.0					
0150-20.			27.0	13.0					
0160			27.0	13.0					
0170-20.			27.0	13.0					
0180#9									

第6表 準位密度パラメータと連続準位と接げる離散準位の番号

a : 準位密度パラメータ, N_c : 離散準位数, E_c : 連続準位接続エネルギー
 (1988年3月20日現在, 今後改訂されることがある。)

核種	a	N _c	E _c	核種	a	N _c	E _c
²³ Na - 23	4.4	16	5.776	²⁹ Cu - 62	9.2	13	0.756
- 24	4.9	9	1.885	- 63	9.5	18	2.536
²⁵ Mg - 25	4.2	31	6.082	²⁹ Cu - 64	10.0	13	0.927
- 26	4.6	15	5.715	- 65	10.5	21	2.753
- 27	5.5	12	3.884	- 66	10.7	13	1.052
²⁶ Al - 26	3.4	26	3.963	- 67	11.0	6	1.950
- 27	3.8	29	6.287	- 68	11.3	4	0.7216
- 28	4.4	21	3.591	³⁰ Zn - 63	9.8	14	1.4376
⁵⁴ Mn - 54	8.9	18	1.6508	- 64	10.0	13	3.0947
- 55	9.2	16	2.429	- 65	10.1	18	1.5881
- 56	9.6	9	0.486	- 66	10.5	11	2.939
⁵⁴ Fe - 54	8.0	9	3.345	- 67	10.9	9	0.9799
- 55	8.4	13	2.5779	- 68	11.3	8	2.5102
- 56	8.7	8	3.123	- 69	11.7	9	1.1797
- 57	9.2	11	1.724	⁸⁶ Sr - 86	16.0	13	2.8784
- 58	9.4	11	2.970	- 87	16.5	13	2.2361
- 59	9.6	13	1.570	- 88	13.5	9	3.6344
⁵⁷ Co - 57	8.0	22	2.981	- 89	13.0	8	2.0790
58	8.6	21	1.435	- 90	14.0	13	3.1448
59	8.7	19	2.722	- 91	16.0		
⁵⁹ Co - 60	9.7	25	1.640	⁸⁹ Y - 89	10.7	10	2.8840
- 61	10.6	6	1.325	- 90	11.2	15	1.8130
- 62	11.5	9	0.706	- 91	11.8	16	2.2794
⁵⁷ Ni - 57	6.8	10	3.370	- 92	14.2	7	0.8924
- 58	7.1	13	3.620	- 93	15.4	10	1.3214
- 59	7.6	13	1.9479	- 94	16.6	8	1.4275
- 60	8.1	19	3.736	⁸⁸ Zr - 88	13.5		
- 61	8.5	19	2.1292	- 89	13.1	10	1.9434
- 62	9.0	13	3.370	- 90	11.3	8	3.3087
- 63	9.4	8	1.324				
- 64	9.8	10	3.393				
- 65	10.3	10	1.594				

第6表 (つづき)

核種	a	N _c	E _c	核種	a	N _c	E _c
⁴⁰ Zr - 91	11.8	15	2.3949	⁴⁵ Rh - 102	16.2		
- 92	11.9	18	3.0579	- 103	16.8	16	0.9201
- 93	13.7	7	1.4255	- 104	17.5	15	0.2968
- 94	14.0	15	2.8606	- 105	18.8	8	0.4992
- 95	15.9	6	1.7211	- 106	20.0	2	0.140
- 96	16.5	8	2.8574	⁴⁶ Pd - 105	17.5		
- 97	17.8	11	2.2639	- 106	18.3	14	2.0843
⁴¹ Nb - 90	10.7			- 107	19.1	10	0.4120
- 91	11.0	14	2.0345	- 108	20.0	11	1.7712
- 92	11.5	20	1.4815	- 109	21.0	11	0.3395
- 93	13.0	13	1.3351	⁴⁷ Ag - 105	15.8	15	1.1663
- 94	14.0	17	0.8187	- 106	16.2	19	0.5652
- 95	16.0	5	0.7567	- 107	16.8	11	0.9910
- 96	16.4	8	0.6945	- 108	17.5	15	0.4084
- 97	18.1	12	1.8515	- 109	18.3	10	0.7353
- 98	18.3	3	0.2260	- 110	18.8	9	0.2370
- 99	18.8	8	1.0153				
- 100	19.6						
⁴² Mo - 91	10.0	9	1.6401				
- 92	10.8	17	3.6880				
- 93	11.7	11	2.1820				
- 94	12.5	20	2.9651				
- 95	13.1	16	1.6451				
⁴² Mo - 96	14.3	18	2.5943				
- 97	15.3	14	1.1168				
- 98	15.8	15	2.3436				
- 99	17.0	15	1.0257				
- 100	17.9	5	1.1361				
- 101	18.8	8	0.2946				

- (1) パラメータ a が未定でも離散準位データの用意されている核種もある。
(2) 表中 N_c 及び E_c が記入されていないものは離散準位データが現在入力されていないもの。

第7表 前平衡過程パラメータと前平衡過程の占める割合

核種	F 2	$\sigma_{\text{pretot}} / \sigma_{\text{compound}}$ ($E_n = 15 \text{ MeV}$)
$^{27}_{13}\text{Al}$	1.2	0.34
$^{59}_{27}\text{Co}$	0.5	0.34
$^{58}_{28}\text{Ni}$	1.4	0.33
$^{60}_{28}\text{Ni}$	1.4	0.25
$^{63}_{29}\text{Cu}$	0.6	0.32
$^{65}_{29}\text{Cu}$	0.6	0.33
$^{64}_{30}\text{Zn}$	1.2	0.20
$^{66}_{30}\text{Zn}$	1.2	0.15
$^{90}_{40}\text{Zr}$	1.6	0.25
$^{91}_{40}\text{Zr}$	1.4	0.32
$^{92}_{40}\text{Zr}$	1.4	0.15
$^{94}_{40}\text{Zr}$	1.4	0.08
$^{93}_{41}\text{Nb}$	0.6	0.37
$^{92}_{42}\text{Mo}$	1.0	0.33
$^{94}_{42}\text{Mo}$	1.0	0.29
$^{95}_{42}\text{Mo}$	1.0	0.20
$^{96}_{42}\text{Mo}$	1.0	0.16
$^{97}_{42}\text{Mo}$	1.0	0.18
$^{98}_{42}\text{Mo}$	1.0	0.12
$^{107}_{47}\text{Ag}$	0.8	0.18
$^{109}_{47}\text{Ag}$	0.8	0.16

第8表 水素の生成断面積
 $E_n = 15\text{MeV}$ 単位(mb)

核種	実験	計算
^{27}Al	405 ± 60 ¹⁵⁾	441
^{59}Co		128
^{58}Ni	1000 ± 120 ¹⁶⁾	1069
^{60}Ni	325 ± 40	354
^{63}Cu	320 ± 45 ¹⁶⁾	345
^{65}Cu	44 ± 5 ¹⁶⁾	47.2
^{93}Nb	51 ± 8 ¹⁷⁾	57.5
^{92}Mo	967 ± 116 ¹⁸⁾	893
^{94}Mo	124 ± 15 ¹⁸⁾	91.5
^{95}Mo	84 ± 10 ¹⁸⁾	72.5
^{96}Mo	64 ± 8 ¹⁸⁾	30.2
^{97}Mo		20.1
^{98}Mo		9.33
^{100}Mo		2.31
Mo	195 ± 30 ¹⁸⁾	162

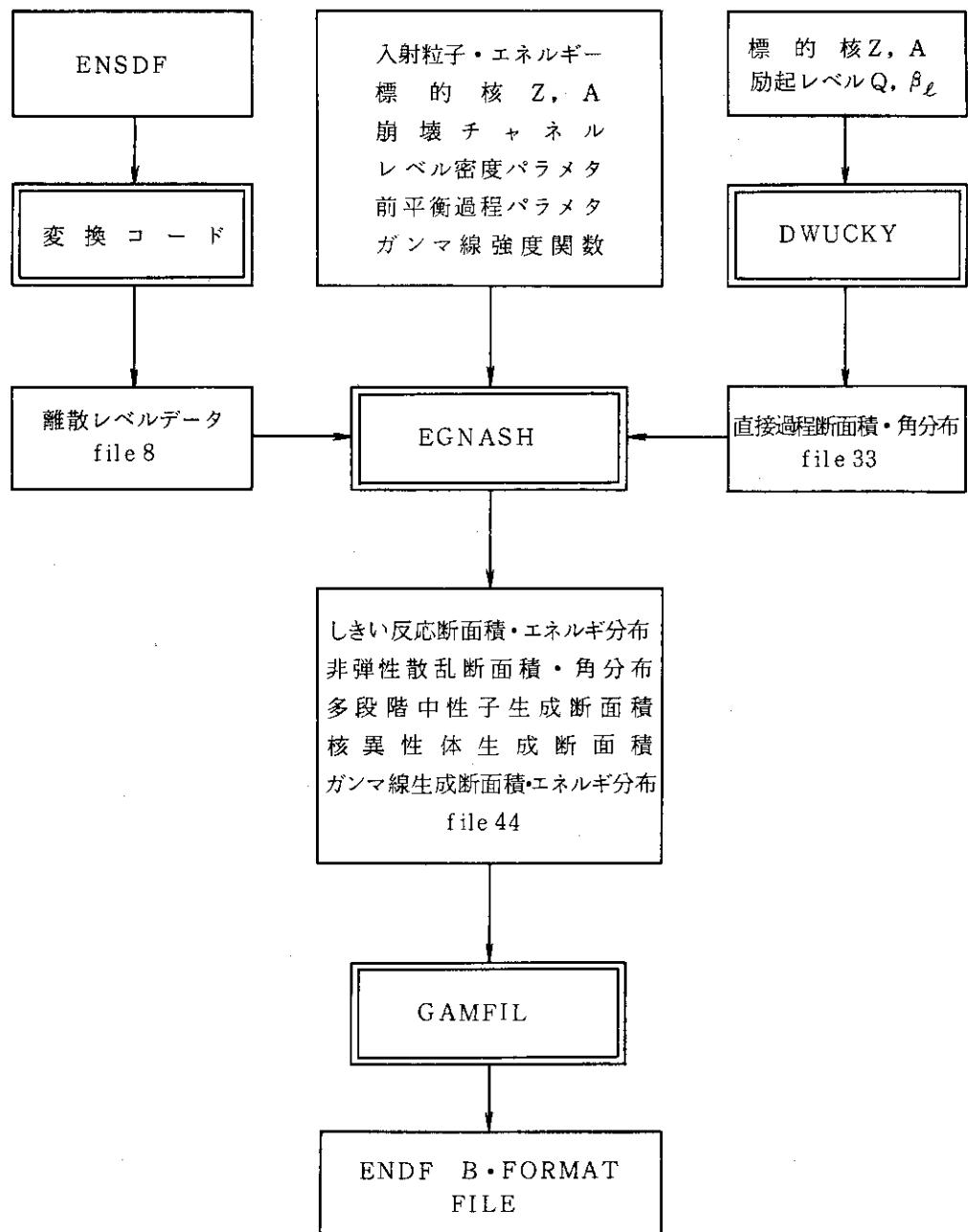
第9表 ヘリウムの生成断面積

 $E_n = 15 \text{ MeV}$ 単位 (mb)

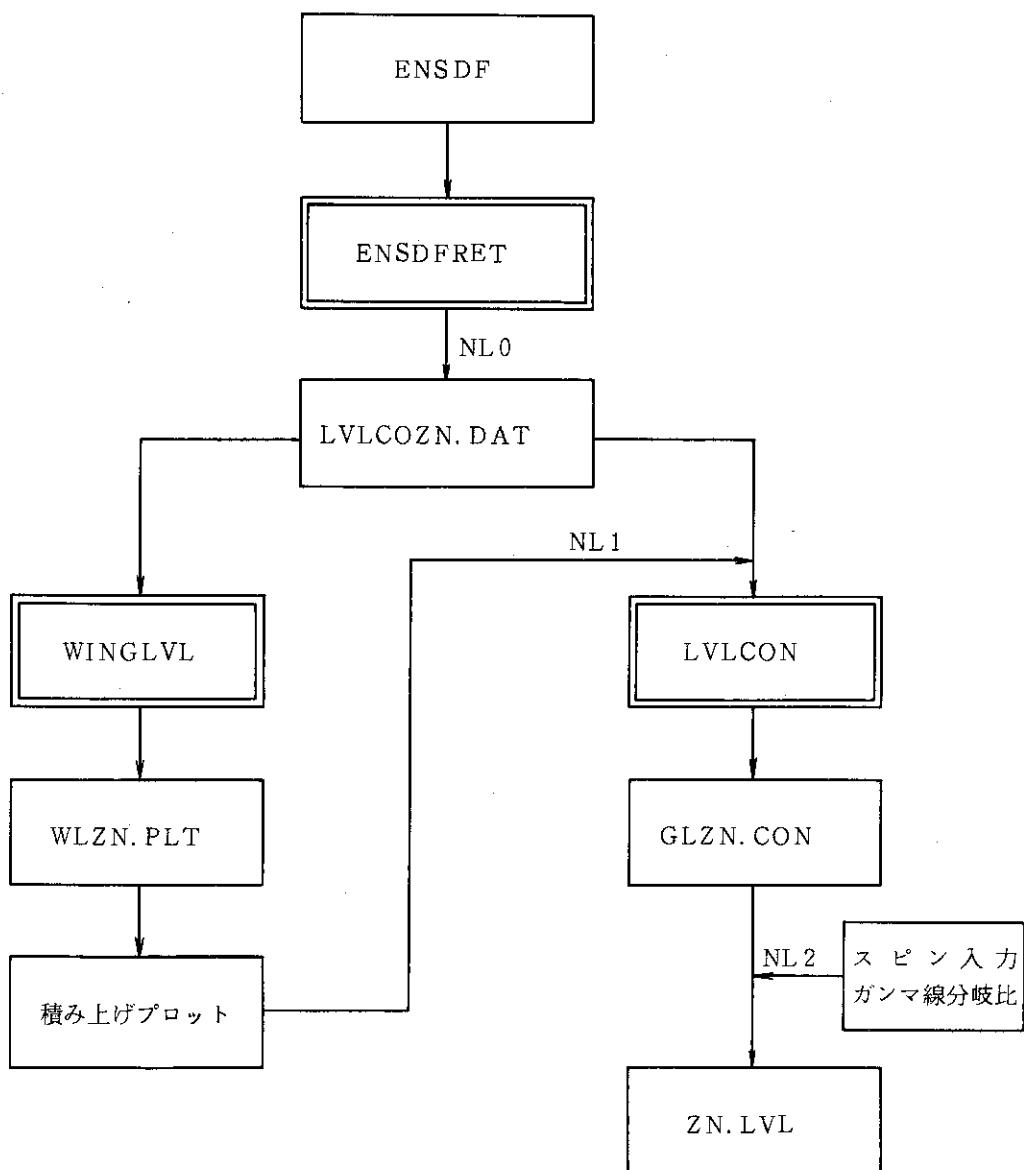
核種	実験 ¹⁹⁾	計算
²⁷ Al	143 ± 7	143
⁵⁹ Co	40 ± 3	39.2
⁵⁸ Ni	121 ± 8	120
⁶⁰ Ni	79 ± 5	73.2
⁶³ Cu	65 ± 4	64.6
⁶⁵ Cu	17 ± 1	17.8
⁹³ Nb	14 ± 1	11.2
⁹² Mo	31 ± 2	27.5
⁹⁴ Mo	22 ± 2	22.1
⁹⁵ Mo	17 ± 1	19.4
⁹⁶ Mo	12 ± 1	10.2
⁹⁷ Mo	10 ± 1	11.6
⁹⁸ Mo	6.7 ± 3.2	6.74
¹⁰⁰ Mo	3.8 ± 0.3	3.49
Zr	10.1 ± 0.7	18.8
Mo	14 ± 1	14.0
Ag	7.6 ± 0.6	7.83

第10表 反応断面積及び基底状態、励起状態生成断面積の出力

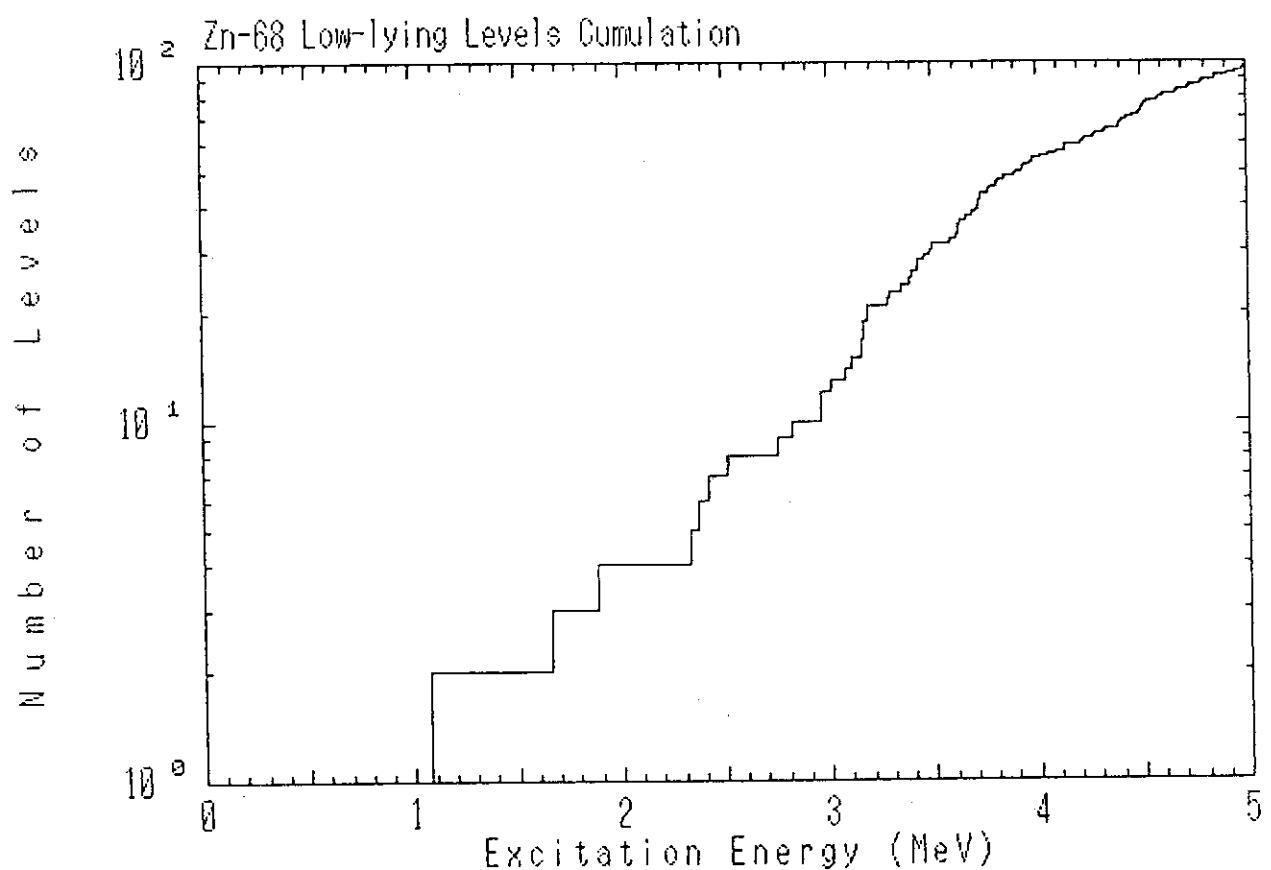
REACTION CROSS SECTIONS		COMPETITION			
ENERGY (MEV)	COMPOUND	PRODUCTSUM	DIRECT	COMPETITION	
1.50E+01	1.469E+03	1.460E+03	5.237E+01	1.255E+03	
1.60E+01	1.464E+03	1.455E+03	4.877E+01	1.278E+03	
1.70E+01	1.453E+03	1.444E+03	4.568E+01	1.287E+03	
1.80E+01	1.445E+03	1.436E+03	4.338E+01	1.296E+03	
1.90E+01	1.440E+03	1.431E+03	4.161E+01	1.302E+03	
2.00E+01	1.435E+03	1.426E+03	3.999E+01	1.308E+03	
IF NO ISOMERIC TRANSITION FOR CAPTURE OR INELASTIC REACTIONS SUBTRACT ISOMER CROSS SECTION FROM COMPETITION CROSS SECTION					
GROUND STATE PRODUCTION CROSS SECTIONS (MB)					
ENERGY (MEV)	28059	28058	28057	27058	27057
1.50E+01	1.152E-04	2.665E+02	4.365E+01	2.562E+02	7.213E+02
1.60E+01	4.685E-05	2.365E+02	4.825E+01	1.886E+02	7.916E+02
1.70E+01	1.984E-05	2.126E+02	4.97E+01	1.445E+02	8.295E+02
1.80E+01	9.262E-06	1.932E+02	5.201E+01	1.170E+02	8.483E+02
1.90E+01	4.223E-06	1.788E+02	5.611E+01	1.010E+02	8.405E+02
2.00E+01	1.985E-06	1.665E+02	6.030E+01	8.681E+01	8.153E+02
ENERGY (MEV)	25054	25053			
1.50E+01	5.570E-01	0.000E+00			
1.60E+01	2.390E+00	0.000E+00			
1.70E+01	6.684E+00	0.000E+00			
1.80E+01	1.327E+01	0.000E+00			
1.90E+01	2.053E+01	1.799E-15			
2.00E+01	2.748E+01	8.626E-11			
1ST EXCITED STATE PRODUCTION CROSS SECTIONS (MB)					
ENERGY (MEV)	28059	28058	28057	27058	27057
1.50E+01	5.059E-05	2.424E+02	1.244E+01	9.412E+01	1.512E+02
1.60E+01	2.072E-05	2.149E+02	1.622E+01	7.056E+01	2.050E+02
1.70E+01	8.821E-06	1.946E+02	1.600E+01	5.442E+01	2.362E+02
1.80E+01	4.139E-06	1.772E+02	1.593E+01	4.439E+01	2.528E+02
1.90E+01	1.895E-06	1.644E+02	1.643E+01	3.832E+01	2.656E+02
2.00E+01	8.936E-07	1.530E+02	1.691E+01	3.306E+01	2.662E+02
ENERGY (MEV)	25054	25053			
1.50E+01	4.811E-02	0.000E+00			
1.60E+01	2.105E-01	0.000E+00			
1.70E+01	6.314E-01	0.000E+00			
1.80E+01	1.399E+00	0.000E+00			
1.90E+01	2.393E+00	0.000E+00			
2.00E+01	3.441E+00	0.000E+00			



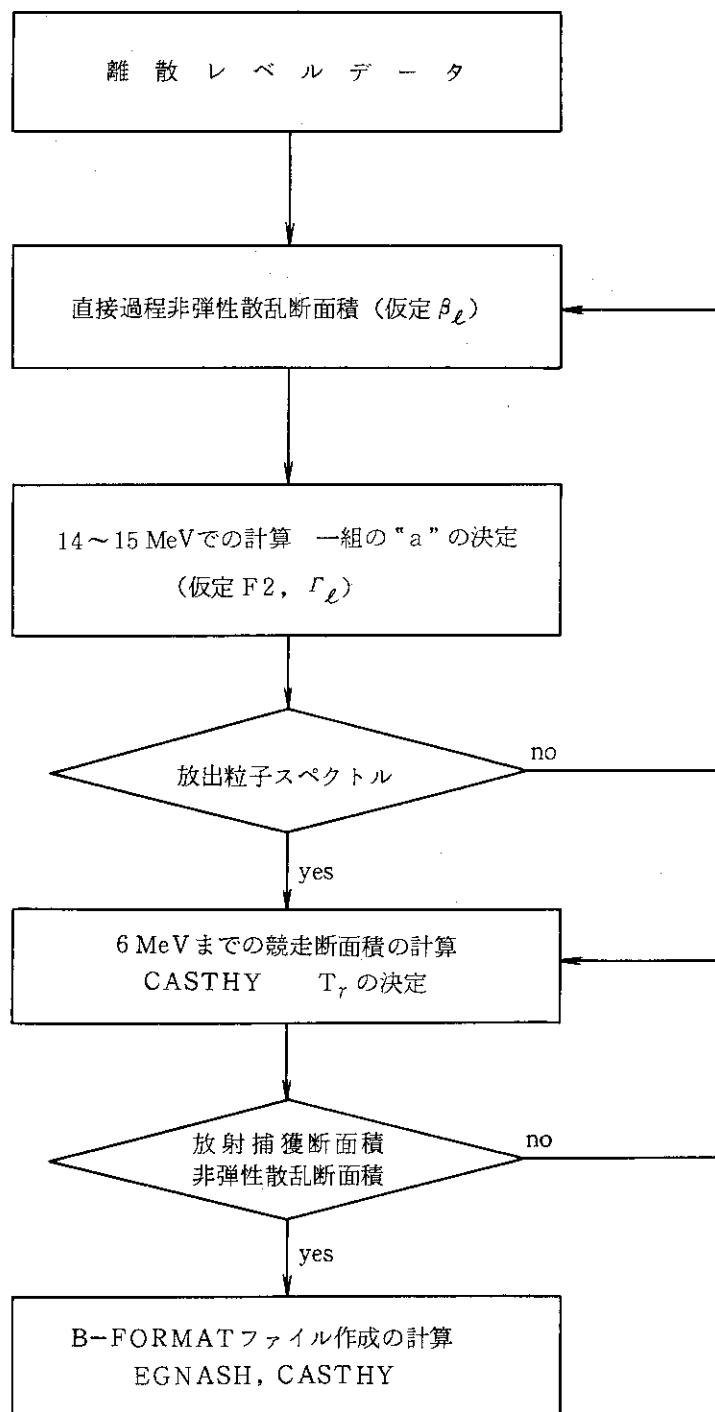
第1図 SINCROS-I の構成



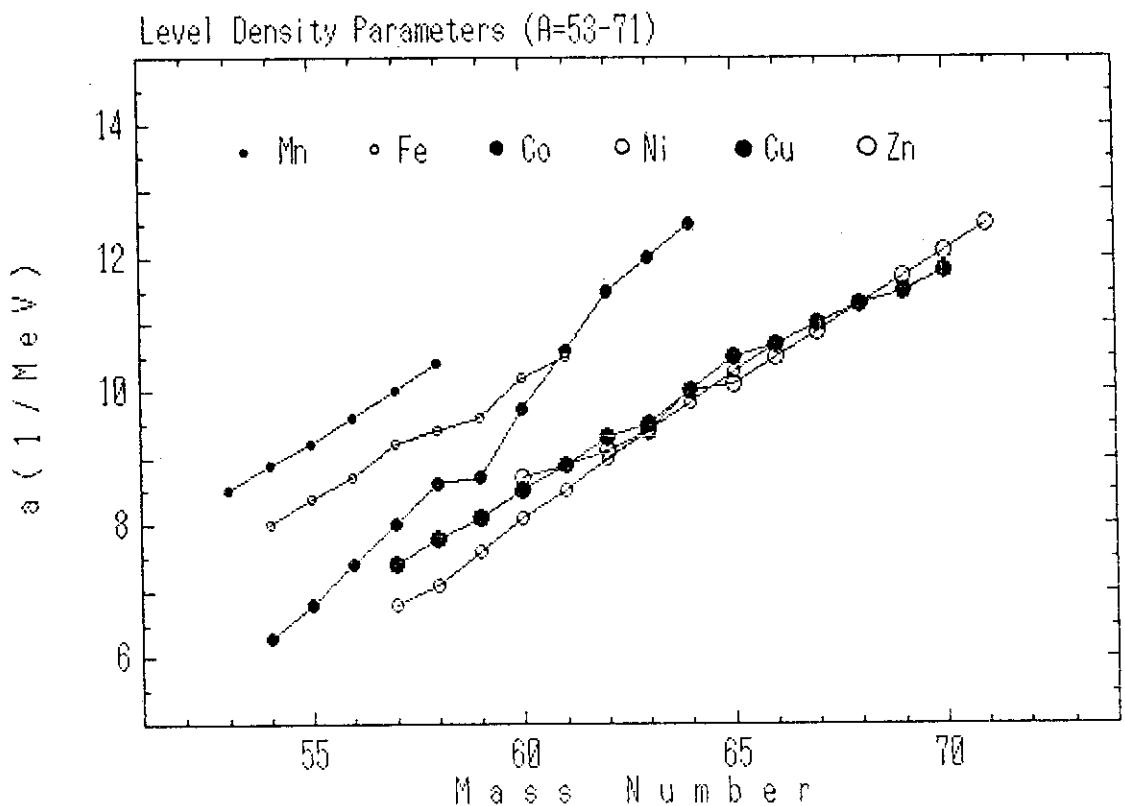
第2図 ENSDFから離散レベルデータの作成



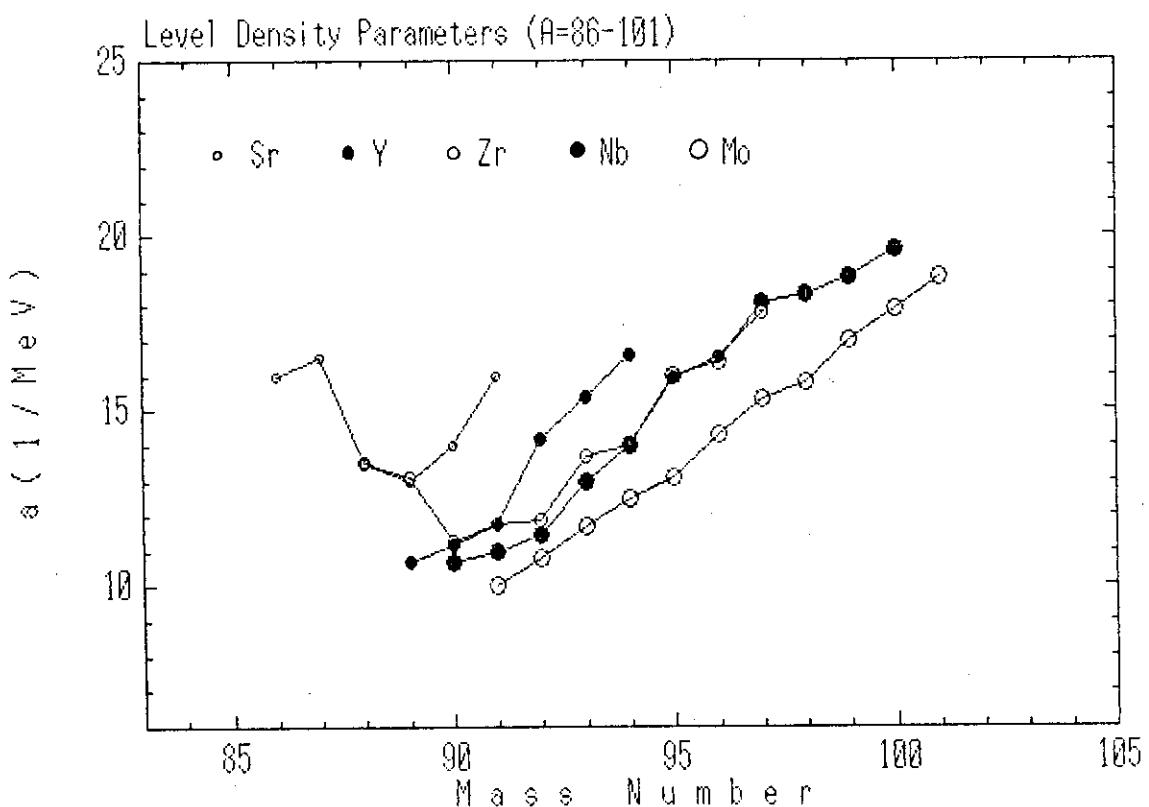
第3図 低エネルギー離散準位の積み上げ



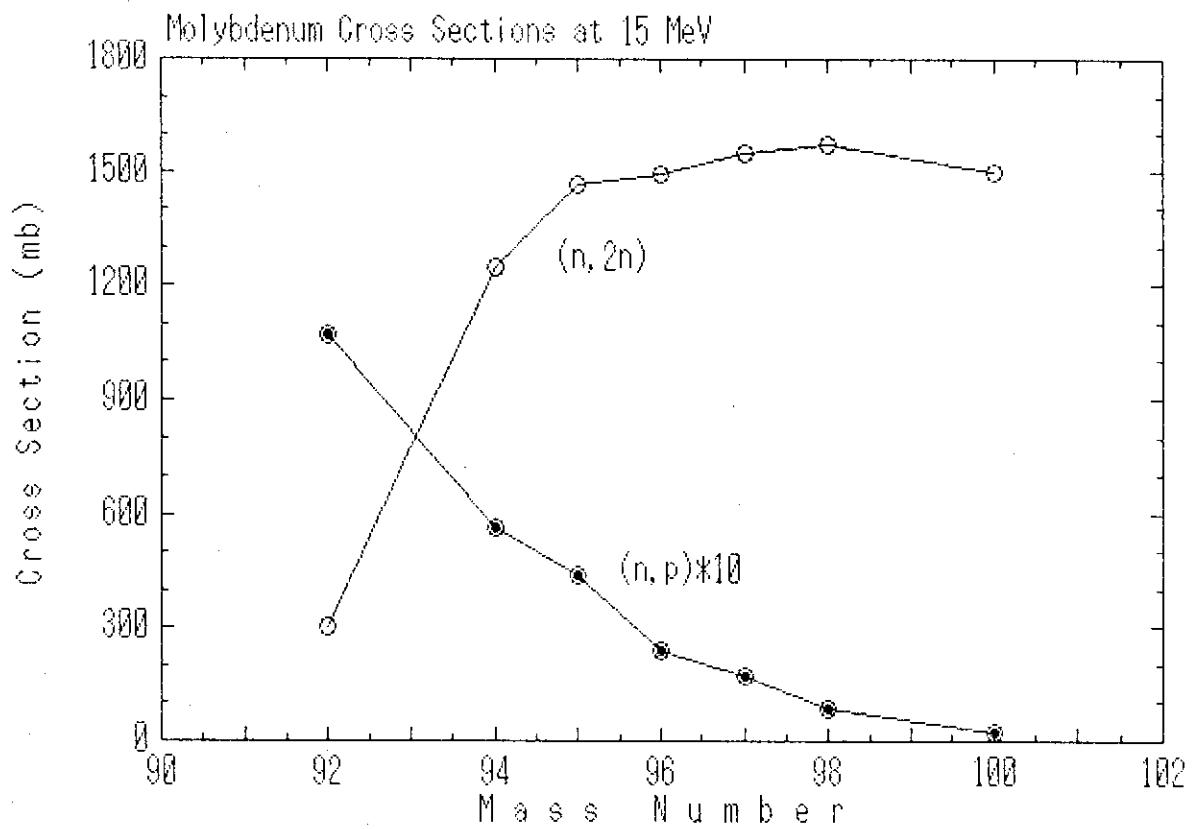
第4図 核断面積計算の標準的手順



第5図 準位密度パラメータの質量数依存性 (Mn-Zn)



第6図 準位密度パラメータの質量数依存性 (Sr-Mo)



第7図 Mo (n, p), (n, 2n) 断面積の質量数依存性

付 錄

核断面積計算図表

